

課題名	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
課題代表者名	野尻幸宏（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	145,381千円（うち22年度 51,587千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	<p>研究体制</p> <p>(1) CO₂増加が沿岸底生生物と生態系に及ぼす影響に関する研究 京都大学</p> <p>(2) CO₂増加が水産重要生物の幼生に及ぼす影響に関する研究 独立行政法人水産総合研究センター</p> <p>(3) CO₂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</p> <p>(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</p> <p>(5) CO₂増加飼育実験の精度管理と沿岸域CO₂分圧変化に関する研究 独立行政法人国立環境研究所</p>
研究概要	<p>研究概要</p> <p>1. はじめに</p> <p>大気中のCO₂が増加して海に溶け込むことで、海のpHは既に低下して来ている。今後のpH低下予測は、海洋モデルで比較的容易に行えるが、実際にそのpH変化（CO₂分圧の増加）で海の生物と生態系にどのような影響が起こるかの知見が不足している。不足の原因は、影響が寿命の長い海の動物に起こると考えられるからであるが、海の動物の飼育には設備と技術が必要であるために実験例が少ない。わが国は、南北に長い気候の異なる海域に臨海施設を有し、多くの生物を飼育する技術を持っている。本研究課題では、わが国沿岸に生息する多様な動物種のうち、CO₂影響が顕著に現れると考えられる石灰化生物（炭酸カルシウムの殻や骨格を持つ生物）として沿岸性底生生物（ウニ、貝類、サンゴなど）を中心に、CO₂分圧（pCO₂）を高めて飼育する実験で影響評価を行う。その背景には、地球温暖化影響を回避するためには超えるべきでない大気CO₂濃度レベル（ガードレール値）を評価するために、pCO₂増加という実感しにくい現象の影響を、認識しやすい海の生物の殻ができなくなるという現象から明らかにする必要があること、また、栽培漁業技術等を利用して漁業生産を確保するには水産重要種の幼生期への影響を明らかにする必要があることがあげられる。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>沿岸の海洋生態系を構成する生物種のうち、水中のpCO₂増加（pH低下）による海洋酸性化影響を最も直接的に受ける生物は、殻や骨格に炭酸カルシウムを利用している生物群であると考えられる。沿岸の底生生物には多くの石灰化生物(calcifier)が含まれるが、従来からの研究で、ウニ類や巻貝類にpCO₂増加に鋭敏に応答する生物種がいることが分かってきた。そのため、サブテーマ1として、沿岸生物のうちCO₂に対する応答性の高い生物種に注目し、低濃度の長期飼育実験から、近未来における影響を把握することを目的とする。低レベルの曝露が中心となるので、水族館での長期飼育の技術を持つ機関が担当する。サブテーマ2では、まだ実験例が十分に多く得られていない水産重要生物の幼生への影響把握を目的とするので、鋭敏な種の探索を行う必要があり比較的高いpCO₂の短期曝露実験から開始することとし、水産生物の飼育技術のある機関が担当する。サブテーマ3と4は協力して、重要な生態系であるサンゴ礁を形成するサンゴと有孔虫へのCO₂影響を研究する。サンゴへの酸性化影響の研究例は、欧米でかなり多くなってきているが、本邦周辺のサンゴは成長速度の遅い種が多くCO₂影響の実態把握研究が十分でない。加えてサンゴの生活史におけるCO₂影響とサンゴ礁を構成する重要な石灰化生物である有孔虫へのCO₂影響も実験する。サブテーマ5では、上記1～4サブテーマの実験を支えるCO₂分圧制御装置の技術開発を行う。特に、低レベルのpCO₂制御から21世紀後半の大気CO₂レベルでの影響を把握できる飼育実験系、日周変動など現実海洋の現象を模擬する実験系の実現を図るとともに、沿岸海洋でのpCO₂変動状況を把握し飼育実験に成果を活用する。</p>

3. 研究の方法

(1) CO₂増加が沿岸底生生物と生態系に及ぼす影響に関する研究

CO₂に対する感受性が高いという知見のあるウニ類への海洋酸性化の影響評価は、これまでにないような長期飼育実験として行った。ただし、実験システムは本研究課題以前から準備していた初期システムを用いたために、水槽のCO₂制御は必ずしも十分に精密ではなかった。水槽そのものを現場CO₂分圧の空気（コントロール区）と現場CO₂分圧+500 ppmの空気（実験区）で曝気することで二つの飼育水槽のCO₂分圧に差を与えたが、実際のCO₂分圧差は300 ppm程度となっていたと考えられた。両水槽にムラサキウニ*Anthocidaris crassispina*の幼稚体50個体をいれ、毎日ワカメを飽食条件で与えて飼育し、個体の体重を3週間ごとに測定した。実験は20ヶ月以上継続実施した。

また本研究プロジェクトのために開発された精密CO₂分圧調整飼育装置（AICAL装置）を用いて、各種の実験を行った。これらの実験では、飼育水槽のCO₂分圧を精密に制御することができた。日周CO₂分圧変動を加味した酸性化条件がバフンウニ*Hemicentrotus pulcherrimus*幼生に与える影響の評価実験、低レベルCO₂分圧（産業革命以前のCO₂分圧に近い条件）がムラサキウニとバフンウニの初期発生に与える影響の評価実験、日周CO₂分圧変動を加味した酸性化条件がクシハダミドリイシ*Acropora hyacinthus*幼個体に与える影響の評価実験、酸性化条件と高水温の複合条件がコユビミドリイシ*Acropora digitifera*幼個体に与える影響の評価実験、低レベルCO₂分圧がコユビミドリイシに与える影響の評価実験など、ウニとサンゴを対象とする飼育実験を行った。

(2) CO₂増加が水産重要生物の幼生に及ぼす影響に関する研究

二酸化炭素濃度調整装置は、国立環境研究所で開発された精密CO₂分圧調整飼育装置（AICAL装置）を用いて予想される将来のCO₂分圧の海水を調整し、海水かけ流しによる飼育実験を行った。海洋生物の幼生が飼育できるよう、飼育チャンパーに工夫をこらした。エゾアワビ初期幼生の飼育実験は、東北水研（宮城県塩釜市）で実施した。成貝に産卵・放精させて発生させる技術を利用した。異なる二酸化炭素濃度下で2回の実験を行った（近未来影響評価と高濃度影響評価）。二酸化炭素濃度別に飼育した個体について、受精率、孵化率、生残率、奇形率（以上止水飼育）、最大幼殻長（ふ化後流水飼育）、変態率、周口殻（親と同じ貝殻）形成率（ふ化幼生を流水で飼育後に止水飼育）を比較した。また、一部の幼生について幼殻の形態を走査型電子顕微鏡によって観察した。

引き続き、エゾアワビ着底初期稚貝実験を、同じく東北水研で行った。初期稚貝にまで変態した個体を実験に用い、異なるpCO₂下で2回の実験を行った（近未来影響評価と高濃度影響評価）。飼育容器の内面には餌料として付着珪藻*Cylindrotheca closterium*を繁茂させ、pCO₂を調整した海水を給水しながら飼育した。飼育開始時および開始後12日目に初期稚貝の最大殻長を測定し、この間の成長速度を求めた。実験終了時に殻の形態を走査型電子顕微鏡で観察した。

アオリイカの実験は中央水研横須賀支所で行った。神奈川県横須賀市長井地先の藻場で産卵直後と思われる卵塊を潜水にて採集、実験室内で5日間馴致後、卵塊を3-6房ずつ切り取り実験海水を入れた飼育チャンパーに吊した状態で保持した。AICAL装置により海水中のpCO₂が大気平衡（約400）、450（対照区）、1000、1500、2000 ppmとなるように調整した海水を1濃度区繰り返し3個の飼育チャンパーに輸送し、50日間飼育した。発生途中で死亡した個体数、ふ化日、ふ化した個体数を毎日記録し、ふ化までの日数（平均加重日数）、ふ化率を算出した。ふ化した個体は同日に5%中性ホルマリンで固定し、湿重量を測定した。その他、サザエを使った実験を中央水研横須賀支所で行い、pCO₂日周変動を加えた実験をエゾアワビを対象として東北水研で行った。

(3) CO₂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

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を行った。沖縄県瀬底島のサンゴ礁で採取した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、実験室内水槽で飼育したところ、そのうちの1個体が無性生殖をしたため、幼個体の実験を行うことができた。4段階の異なるpH（pH 8.3、8.2（対照区）、7.9、7.7）区で71日間の飼育後、殻サイズ・殻重量・殻室数などを計測した。また、琉球大学瀬底実験所において、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を行った。

その後は、本プロジェクトのために開発された精密CO₂分圧調整飼育装置（AICAL装置）を用いて、有孔虫を中心とする造礁サンゴの生物に関する石灰化のCO₂影響評価実験を行った。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違いを明らかにする飼育実験を繰り返し実施した。

(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

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pCO₂の異なる海水を

水族館の供給海水は、タンクに一時的に貯留されたものであるため、取水口のCO₂分圧より既に100-300 ppm程度高まっていることが分かった。そのため、水族館等の生物は現在の大気CO₂濃度より既に高いCO₂環境で飼育されている場合が多いと考えられた。供給海水のCO₂分圧が400-700 ppmの実験時には、コントロール区の水槽内CO₂分圧は、バブリング空気のCO₂分圧と近いレベルには制御しきれず200 ppm程度高いことが明らかとなった。一方、高分圧区については、900-1200 ppmの供給空気CO₂濃度に水槽内CO₂分圧がほぼ追従していた。水槽では生物等の呼吸によるCO₂発生が影響し、バブリングのみで水槽内のCO₂分圧を低下させることが困難であると考えられた。しかしながら、実験において高分圧区は供給海水+約600 ppm、コントロール区は供給海水+約300 ppmでおおよそ維持されていたと考えられ、CO₂分圧差が保たれた飼育実験として意義があった。

両区のウニの体重差は14ヶ月頃から見えはじめ、高濃度CO₂条件が成長阻害要因になっている可能性が示唆された。これは以前の小型水槽静止水での長期実験(CO₂分圧差500 ppm)でツマジロナガウニについて16週間目から差が見え始めてきたのに比べ、かなり影響発現が遅くなったものと考えられる。

本研究プロジェクトのために開発された精密CO₂分圧調整飼育装置(AICAL装置)を用いた各種実験のうちでは、日周CO₂分圧変動を加味した酸性化条件がクシハダミドリイシ幼個体に与える影響の評価実験で顕著な結果が得られた。実験後に計測した各条件の幼個体の骨格表面積は475 ppmでは $1.05 \pm 0.03 \text{ mm}^2$ 、605 ppmでは $0.98 \pm 0.03 \text{ mm}^2$ 、800 ppmでは $0.96 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ 、1000 ppmでは $0.90 \pm 0.05 \text{ mm}^2$ となり、CO₂分圧値との強い相関を示した($y = -0.03 \times 10^{-2}x + 1.152$ 、 $R^2 = 0.9316$ 、 $p < 0.05$ 、図3の回帰直線)。これと比較して日周変動をつけた条件(600と1000 ppmの12時間サイクル)では $0.90 \pm 0.02 \text{ mm}^2$ となり、平均CO₂分圧をx軸とした回帰直線よりも著しく低い値となった。すなわち600 ppmと1000 ppmに12時間毎に曝露される条件は、800 ppm一定値に曝露されるのと平均値は同じであるものの、幼個体の骨格表面積は小さくなり、1000 ppm一定値に曝露されるのとほとんど同じになった。これは日周変動の高値による影響が支配的であることを意味していると考えられ、

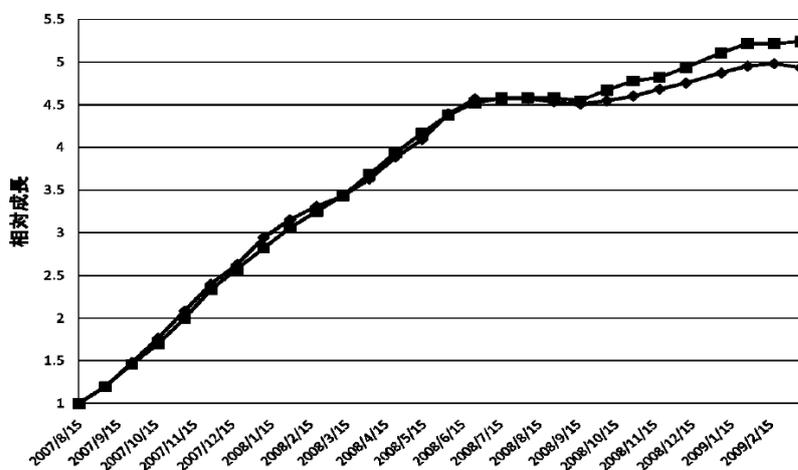


図2 ムラサキウニの相対成長。■：コントロール区 ◆：CO₂高分圧区。実験開始後14か月の間はほとんど差がみられないが、その後、相対成長は高分圧区の方がコントロール区より低い傾向が次第に顕著になった。

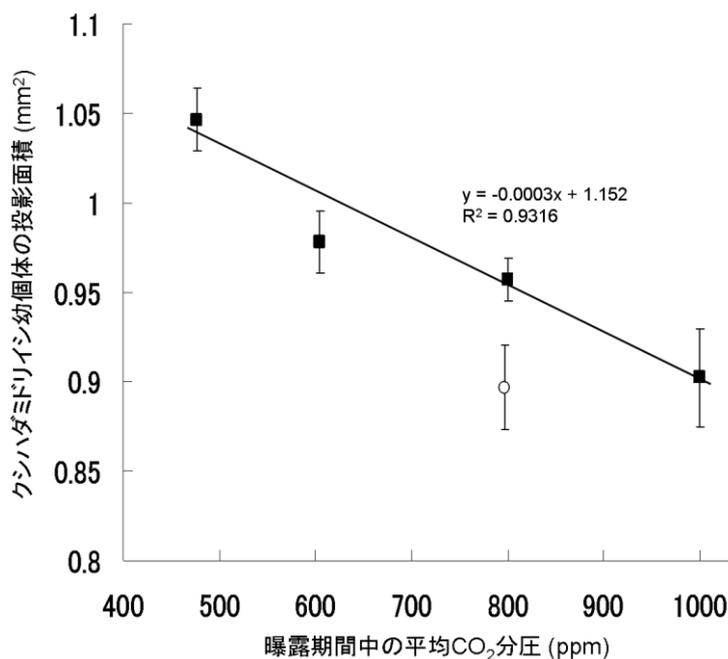


図3 日周CO₂分圧変動を加味した酸性化条件がクシハダミドリイシ幼個体に与える影響。10日間各条件に曝露した幼個体の投影面積、黒四角(■)：475 ppmから1000 ppmの固定CO₂分圧条件、白丸(○)：600 ppmと1000 ppmの12時間変動サイクル条件(平均値±標準誤差、サンプル数 n=4)。回帰直線と回帰式は475 ppmから1000 ppmのCO₂分圧条件に曝露した幼個体の投影面積より算出。日周変動を加味した酸性化条件に曝した幼個体の投影面積はこの回帰式の下に位置しているのが分かる

海洋酸性化の海洋生物への影響評価をより正確に行うためには、本実験におけるCO₂分圧の日周変動を加味した条件のような、より自然条件に近い実験条件を用いる必要があることが示唆された。

(2) CO₂増加が水産重要生物の幼生に及ぼす影響に関する研究

ふ化直後のエゾアワビ幼生について、1500 ppmのpCO₂を超える海水では、受精率、ふ化率(ふ化直後)、死亡率、奇形率(幼殻の奇形を含む)、幼殻長(ふ化後75時間後)において影響があることが示された。一方で、1100 ppmのpCO₂以下の実験区では大きな影響はほとんど認められなかった。今回のエゾアワビでの結果は、過去に得られた二枚貝のふ化率や奇形率の結果と不整合はなく、ふ化直後数日間の危機的な値として、1500 ppm前後の値が重要になっている可能性が示唆された。今回の実験で用いた海水のアラゴナイト飽和度 Ω を計算すると、1000-1500 ppmの間で $\Omega = 1$ になっており、1以下になると影響が現れることが推測された。変態率についてpCO₂濃度が高くなってても対照区と比べあまり変わらなかったことは、巻貝では変態期直前以降は高pCO₂環境への感受性が変わることを示しているのかもしれない。

初期稚貝の実験の結果は、近未来影響評価実験(最高濃度1200 ppm)では、成長速度に有意な差が認められなかったが、高濃度影響評価実験(最高濃度2000 ppm)では、1500 ppmでの成長速度は対照区の450 ppmと比較して有意に低く、2000 ppmでは他のすべての濃度区と比較して最も低い成長速度を示した。初期稚貝を変態直後から44日間(実験1)または33日間(実験2)飼育し、殻表面をSEMで観察した結果を図4に示す。この2回の実験観察結果を集約すると、pCO₂が600 ppm以下では正常に殻が形成されるが、800 ppm以上になると、貝殻外層が部分的に剥離したような跡が認められた(Exp 1の矢印、1200 ppmの下の矢印を除く)。1000-1500 ppmになると貝殻表面に穴が認められるようになり

(Exp 2の矢印とExp 1の1200 ppmの下の矢印)、2000 ppmでは着底後の比較的初期に形成された殻が溶解し大部分が失われていた(点線の丸の範囲内)。

pCO₂ 1200 ppm以下では殻の成長速度に有意差が認められなかったため、少なくとも上記濃度内では殻が伸張する方向の形成速度には影響しないと考えられる。成長速度が有意に低下した1500および2000 ppm区においても、縁辺部には新たな殻が形成されており、この部位には殻が溶解した痕跡が認められなかった。したがって、1500 ppm以上で見られた成長速度の低下は、殻の溶解によるものではなく、形成速度が低下したことによるものと考えられる。

また、初期稚貝を800 ppmで飼育した場合には貝殻外層に異常が認められた。このときのアラゴナイト飽和度は1.46であり、また殻が部分的に溶解し穴が開いていた1500 ppmでは1.02、殻の溶解が著しかった2000 ppmでは0.77であった。これらのことから、エゾアワビ初期稚貝ではアラゴナイト飽和度が1を下回らなくても800 ppm程度のpCO₂で貝殻外層に影響が出始める可能性があることが示唆された。

アオリイカの実験においては、1500, 2000 ppm区でも顕著なCO₂影響は現れず、幼生期においてCO₂に対する感受性が低いことが明らかになった。サザエの稚貝の実験では1000 ppm以上の分圧条件においてCO₂影響が現れた。エゾアワビにおいてpCO₂日周変動を加えた実験では、±400 ppmというやや誇張した条件を与えたところ、奇形率や幼殻長などで、日周変化区では日最高濃度が影響を支配することが明らかになった。

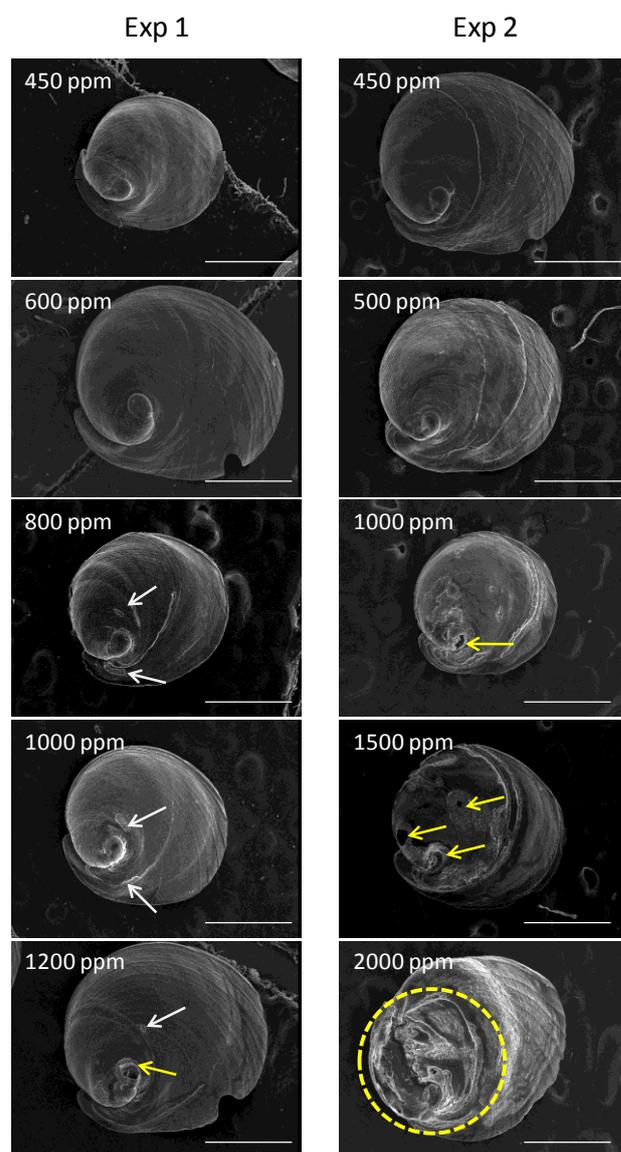


図4 異なる pCO₂ 下でエゾアワビ初期稚貝を変態直後から44日間(実験1)または33日間(実験2)飼育した場合の殻の電子顕微鏡像。

(3) CO₂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

無性生殖した大型有孔虫ゼニイシ(*M. kudakajimensis*)の幼個体を約10週間飼育した。4段階の異なるpH (pH 8.3、8.2 (対照区)、7.9、7.7) 区で、殻のサイズ・重量・殻室数はpHに依存して変化し、高いpHほど大きな成長を示した(図5)。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。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。

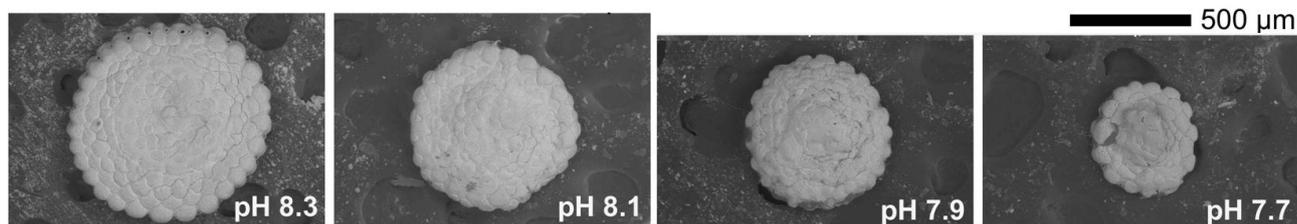


図5 ゼニイシの幼個体(メガロスリック個体)の走査電子顕微鏡画像。各pH条件区の平均的な最大径を持つ個体を比較した。海水pH値はNBSスケール。

主要なサンゴ礁棲有孔虫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、飼育実験を行なった。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CO₂分圧制御装置によってCO₂分圧を5段階(約300, 400, 600, 800, 1000 μatm)に設定し、水温27°Cにおいて245 μatmから907 μatmに至る5段階の海水で有孔虫の飼育が行なった。これらの実験条件に対応する方解石(カルサイト)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CO₂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6)。一方、炭酸イオン濃度を現在の平均的な値216 μmol kg⁻¹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 μmol kg⁻¹)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量が低下することが知られている。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。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

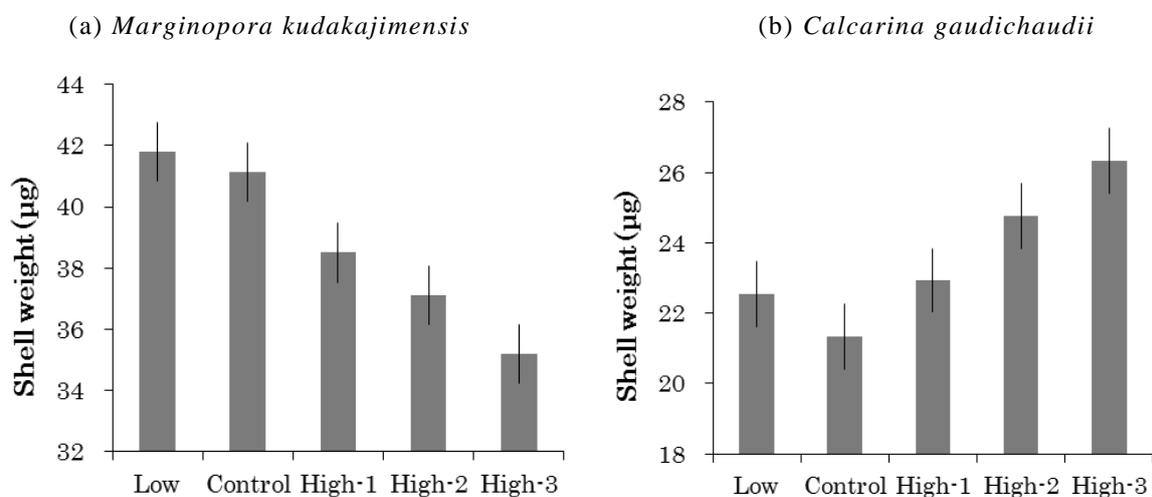


図6 精密CO₂制御システムを用いたサンゴ礁棲有孔虫2種の酸性化海水に対する石灰化量の応答性の違い。誤差棒は標準誤差(±1 SE)を示す。

に対して、*Calcarina gaudichaudii*は珪藻を共生させている。海水中のCO₂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。

(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

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。また、浮遊幼生の生存率に処理間でも有意な差は見られなかった。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が、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が、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。

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減少した。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。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、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。

精密pCO₂制御装置によって作成した産業革命前のCO₂条件の海水を用いる飼育実験では顕著な結果が得られた。群体形成期の石灰化率を測定する枝片実験で、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7)が、一方で300ppmと他のpCO₂条件間では、明らかな差が見られた(図7)。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。

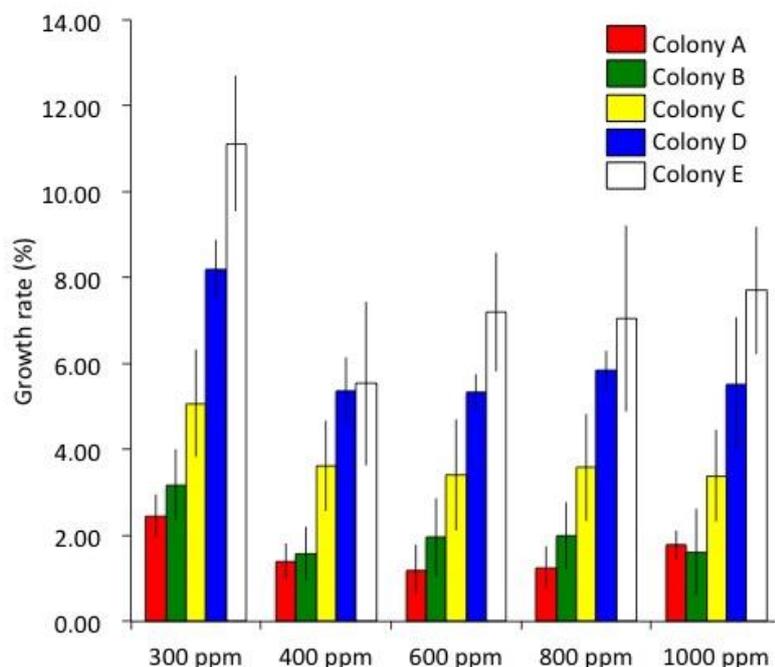


図7 酸性化海水がコユビミドリイシの群体形成期の石灰化率に及ぼす影響。縦軸は石灰化率、横軸は実験に用いた海水のpCO₂を示す。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

(5) CO₂増加飼育実験の精度管理と沿岸域CO₂分圧変化に関する研究

本研究のために開発したCO₂分圧調整装置は、供給海水のCO₂分圧を計測し、そこに一定のCO₂を加えて自然の日周変動を保ちながら一定のCO₂分圧を増加させることができ、将来のCO₂環境を良く模擬する状態で生物を飼育するような海水を作る機能を持っている。その目的もあり、装置の運転中に供給海水のCO₂分圧データを計測する仕組みとした。その副産物として、沿岸海域のCO₂分圧の季節変動、日周変動を知ることができる。そこで、研究プロジェクトに参加している4箇所の臨海実験施設における供給海水CO₂分圧測定データをまとめて解析した。

図8には、日周変動幅の比較的大きな横須賀と白浜の両実験所における日平均値(点)と日振幅(最大値マイナス最小値の大きさを棒の長さで表現した)を示した。実験所によっては装置利用期間が飛び飛びで、そのままでは年変動を把握しづらいことがあるので、3年のデータを同じ月日について重ねて示した。

塩釜(東北区水産研究所、塩釜市新浜町)では、塩釜湾のヨットハーバーに近い磯場から取水している。横須賀(中央水産研究所横須賀庁舎、横須賀市長井)では、相模湾に面した自然な磯場から取水している。白浜(京都大学瀬戸臨海実験所、和歌山県白浜町)では、磯場の浅い入り江から取水している。瀬底(琉球大学熱帯生物圏研究センター瀬底実験所、沖縄県本部町)では、サンゴ

礁の磯場から取水している。いずれの実験所のデータでも、水温の低下する冬にCO₂分圧は低く、水温の高まる夏およびそれに続く秋にCO₂分圧が高まる。特に塩釜では、8月から10月にかけては、CO₂分圧が著しく高まって1000 ppmに達することもあり、CO₂の影響を見る飼育実験を行うことができなかつた。塩釜と瀬底では、日周変動幅が小さく、横須賀と白浜で日周変動幅が大きい。

沿岸生物の酸性化影響評価実験において、平均的な日周変動を与えながらCO₂の影響を評価するのが単純な考え方であるが、日周変化は地点毎に大きく異なる上に夏に大きく冬に小さいことが明らかになった。例えば横須賀で日周変化が最大を示した2010年7月について振幅が256ppm±73ppm、

同じく白浜では2010年7月について324ppm±116ppmであった。生物影響はCO₂濃度の日最大値で特に作用する観点で考えると、標準偏差の1倍の効果を実験で与えたとしたら、横須賀と白浜での最大振幅の月についてそれぞれ±165ppm (peak to peakは329ppm) および±220ppm (peak to peakは440ppm) の日振幅、標準偏差の2倍を与えたとしたら±201ppm (peak to peakは402ppm) および278ppm (peak to peakは556ppm) となる。この観測結果のまとめは、生物飼育実験において与えるべき日周変化の値の参考になるものであり、実験参画機関の一つが行っている±200ppmの幅(振幅で400ppm)は沿岸海洋で現実に起こっている大きめの日周振幅であることがわかった。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

従来の研究においては、海洋生物への海洋酸性化影響評価のための飼育実験は、一定のpCO₂条件で研究が進められてきたが、本研究では日周変動の効果を確認する実験も始まった。また、臨海実験所におけるCO₂分圧変化のデータも取りまとめられ、実際に現場で計測された日周変動の値を参考にした飼育実験が行われるようになった。また、海水のCO₂の制御装置の性能を活かして、産業革命以前のpCO₂が及ぼす影響の評価も始まった。

2011年1月に、わが国のホストによるIPCCワークショップ、Impact of ocean acidification on marine biology and ecosystemが沖縄県万国津梁館において開催された。会議において研究代表者は、海洋酸性化の生物種影響の今後の研究の進め方についてワークショップの議論をまとめるプレナリー発表を行った。海洋酸性化の生物種影響の実験においては、これまで現在大気濃度より著しく高い1000 ppmから2000 ppmのようなCO₂分圧範囲の影響を調べるのが主流であったが、21世紀中に起こる影響を評価するためには、400, 600, 800 ppmというような低濃度の飼育実験を行う必要がある。そのような低濃度の評価においては、正確さの高いCO₂制御を行うこと、濃度が低いことから生ずる季節変動や日周変動のようなものが加わる効果を考慮する必要がある、とまとめた。

本研究課題で開発し飼育実験への応用が進んだCO₂制御技術が、海洋酸性化の生物影響に関する世界最先端の研究を支えてプロジェクトが進んだ。これは、今後の世界の研究に方向性を与えるものであり、CO₂制御技術は今後世界の研究コミュニティに広がると考えられる。

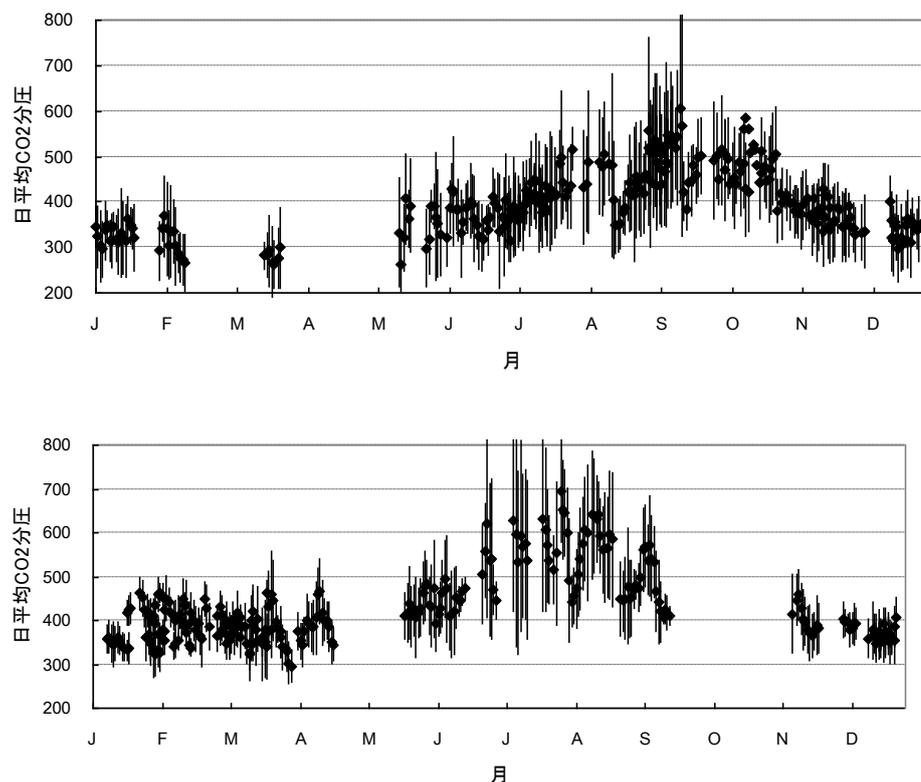


図8 横須賀(上図、中央水産研究所横須賀支所)および白浜(下図、京都大学瀬戸臨海実験所)で観測された実験所供給海水のpCO₂変化。2008年11月から2011年3月の観測結果を重ねてプロットした。棒の長さが日周変化幅を示す。

(2) 地球環境政策への貢献

海洋生物への酸性化影響はIPCC第4次評価報告書統合報告にも強調されている問題で、温暖化対策政策を間接的に支援する研究成果として期待されている。すなわち、海洋酸性化の影響評価は、CO₂排出削減を温暖化対策以外の重要な必要性として指摘するものである。前項に示した海洋酸性化に関するIPCCワークショップは、IPCC第5次評価報告書において海洋酸性化の記述を第一作業部会と第二作業部会の間で統一的にまとめるための議論を行う重要な会議であった。環境省がホストし、本課題研究代表者がわが国を代表として開催支援を行った。本研究プロジェクトグループの協力もあり、成功裏に開催できた。会合のサイドイベントでは、本課題関係の発表が数多くなされた。

6. 研究者略歴

課題代表者：野尻幸宏

1956年生まれ、東京大学理学部卒業、理学博士、国立公害研究所研究員、主任研究員
内閣府参事官等を経て、現在、国立環境研究所地球環境研究センター副センター長

主要参画研究者

(1) : 白山義久

1955年生まれ、東京大学理学部卒業、理学博士、東京大学海洋研究所助手、助教授を経て
現在、京都大学フィールド科学教育センターセンター長・教授

(2) : 木村 量

1963年生まれ、京都大学農学部卒業、農学博士、現在、水産総合研究センター
中央水産研究所浅海増殖部生物特性研究室室長

高見秀輝

1966年生まれ、東京水産大学水産学部卒業、農学博士、現在、水産総合研究センター
東北区水産研究所海区水産業研究部沿岸資源研究室主任研究員

小埜恒夫

1968年生まれ、北海道大学水産学部卒業、水産学博士、海洋科学技術センター等を経て、
現在、水産総合研究センター北海道区水産研究所亜寒帯海洋環境部生物環境研究室長

(3) : 鈴木 淳

1965年生まれ、東北大学理学部卒業、理学博士、工業技術院地質調査所研究員を経て、
現在、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グループ長

(4) : 酒井一彦

1957年生まれ、琉球大学理工学部卒業、理学博士、琉球大学熱帯生物圏研究センター
准教授を経て、現在、琉球大学熱帯生物圏研究センター教授

(5) : 野尻幸宏 (同上)

7. 成果発表状況 (本研究課題に係る論文発表状況。)

(1) 査読付き論文

- 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* 18, 103-107 (2010).
- 2) 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).
- 3) 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).
- 4) 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 (2010).
- 5) Kimura R, Takami H, Ono H, Onitsuka T, and Nojiri Y: Effects of elevated pCO₂ on the early development of the commercially important gastropod, Ezo abalone *Haliotis discus hanna*, *Fisheries Oceanography* 20, 357-366 (2011).
- 6) 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).
- 7) Fujita K, Hikami M, Suzuki A, Kuroyanagi A, Kawahata H and Nojiri Y. Effects of ocean acidification on calcification of symbiont-bearing reef foraminifers, *Biogeosciences* 8, 2089-2098 (2011).

