

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

(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 地球環境研究センター

野尻 幸宏

平成20～22年度累計予算額：60.381千円（うち、平成22年度予算額：23,587千円）

予算額は、間接経費を含む

[要旨] 大気中の二酸化炭素(CO₂)が増加して海に溶け込むことで、海のpHは既に低下してきた。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低下(CO₂分圧上昇)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。影響が寿命の長い動物に起こると考えられるが、海の動物の飼育には設備と技術が必要で実験例が少ない。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分圧を高めて飼育する実験で影響評価を行う。本サブテーマでは、制御に工夫を施した装置を開発製作し参加機関の生物飼育実験に供することとし、実施初年度に装置の開発を急ぎ、初年度後半には各参画機関に制御装置を導入することができた。2年度目にかけて導入した装置の正確さを確認する実験を行い、運転の際に注意すべき点を明らかにした。また、現実海洋を模した飼育実験には、沿岸海洋環境のCO₂分圧の季節変化と日周変化の把握が重要と考え、初年度後半から2、3年度に実施した実験所の供給海水のCO₂分圧測定結果について整理した。藻場に比較的近い実験所(横須賀、白浜)で大きな季節変化と日周変動を確認し、7月から9月には日振幅の月平均値として200ppmを越す日周変動があることがわかった。日周変動は夕方から夜に最低、明け方から朝に最高の分圧値を示すので、生物生産要因が支配的と考えられた。また、CO₂分圧の季節変動パターンは概ね共通していて、冬から春に最低を、夏から秋に最大値をとることがわかった。ただし、年間平均のCO₂分圧は、サンゴ礁域の瀬底で最も低く、富栄養海水の影響を受けている塩釜で最も高かった。このような沿岸域海水のCO₂分圧変動要因解析は、沿岸性生物の酸性化影響およびそれを明らかにする実験に重要な情報であり、装置に用意した先進的な機能である日周変動を保ちながらCO₂濃度を高めて飼育する近未来の沿岸海洋環境模擬実験に結果が生かされる。

[キーワード] 二酸化炭素、海洋酸性化影響、動物実験、実験装置、二酸化炭素分圧制御

1. はじめに

CO₂増加で気候が変動し昇温が主たる原因で地球システムに影響が出るといういわゆる温暖化影響と異なり、CO₂そのものが酸として働き海洋のpHがじわじわと低下する海洋酸性化は既に起こりつつあるし、大気CO₂濃度増加で今後さらに進む。炭酸カルシウム(CaCO₃)という海洋生物が必要とする固体物質の生産が困難になるという形でその影響が現れると考えられている。少なくとも、大気CO₂濃度が600 ppm程度になると水温の低い南極海や北太平洋高緯度でその影響が出ることは確実と考えられ、中程度の人為起源CO₂排出シナリオあるいはそれ以上の排出量では21世紀中頃から21世紀末までの間に発現する。それはCaCO₃の結晶形の一つで高緯度海域に生息する翼足

類が殻形成に用いているアラゴナイトが海水中で未飽和になるためである。また、大気CO₂増加による海洋影響は、地球全域で起こるために発現してしまった後で絶滅種や生態系を修復することが困難な可能性が高く、環境影響を回避するにはCO₂を大気に放出しないという根本的対策が必要になる点で、根源的な地球温暖化関連問題である。

CO₂排出対策技術の必要性の検討には、海洋酸性化で起こる現象を予測し、その影響評価を加味することが重要であり、CO₂排出対策を進める後押しになる。温暖化影響評価にとってあいまいさがある気温の昇温幅より、海洋生態系にダメージを与えるCO₂濃度を明快に示すことができ、環境影響防止のための大気CO₂濃度「ガードレール値」を示すことができる。この場合、影響評価にCO₂の気候感度(ある大気濃度増加がもたらす全球気温の上昇指数)の不確実性が入らない。

現在までの科学的知見で、大気濃度増加シナリオに対応してCO₂が海洋に吸収されて起こる酸性化を化学量で表現すること、すなわち今後の海洋pH変化として予測することは、海洋モデルを用いて比較的容易に行える。しかしながら、実際にそのpH変化で生物と生態系に何が起こるかの知見は決定的に不足している。不足の原因は、決定的な影響が寿命の長い大型生物に起こり得るからである。植物プランクトンなど世代交代の短い生物種の実験は比較的容易であるにせよ、実験的知見が十分とはいえない。しかし、より困難なのは大型で長寿命の海洋生物のCO₂影響把握実験であって、確立した飼育技術が必要であり、飼育は適当な場所で優れた技術のもとでしか行えないことが多い。研究を実施できる臨海施設は限られ、欧米でも研究の絶対数が不足している。

2. 研究目的

本研究課題全体で、日周変動の模擬が可能な沿岸海洋のCO₂環境を正確に模する実験系を作り、近い将来に予測される大気中CO₂濃度の上昇が沿岸底生生物に与える影響を飼育実験から正しく評価することを目的とする。これまでの研究はおおむね水中のCO₂分圧を一定に高めて（pHを一定に下げて）行なわれた実験に基づく。しかしながら、沿岸海域では光合成と分解の日周変化に伴ってCO₂分圧は変動し、昼間は低く夜間は高い。このような日周変化は、昼間の低濃度が生物にCO₂のストレスからの回復を可能にしたり、あるいは夜間の高濃度が大きなインパクトを与えたりする可能性を含んでいる。このことから、実際の海洋での環境変動を実験に取り入れなければ、将来の大気中CO₂濃度の上昇が沿岸底生生物に与える影響を正確に予想することはできないと考えた。本サブテーマでは、初年度は高度のCO₂分圧制御が可能な飼育装置を製作して実験担当機関に供給し、他のサブテーマによる飼育実験をできるだけ早く開始させることを目指し、その設計、予備実験、製作、設置を行う。また、2年度以降においては、分担機関での装置の運転実績や問題点を踏まえて実験装置の性能確認の実験や可能な改良を行うとともに、実験装置に計測機能を持たせた供給原水のCO₂分圧の測定結果について整理し、沿岸海洋環境で現実に起こっているCO₂分圧の季節変動と日周変動を評価することを研究の目的とした。

3. 研究方法

従来から、CO₂ガスで海水のCO₂分圧を調整し高pCO₂分圧の影響を調べる動物飼育系として、1) 環境大気とCO₂を一定比率で混合して高CO₂濃度の空気を作り（ガス中のCO₂濃度は測定しない）、水槽をその空気でバブリングして平衡にする装置、2) 規定濃度のCO₂を混合した空気をガス生成装置で作る（ガス中のCO₂濃度を測定して調整する）、水槽をその空気でバブリングして平衡に

する装置、3) pHが上がればCO₂を水槽に送り込み、下がればゼロ空気を送り込んでpHを維持する装置（pHスタット）、などが用いられてきた。しかしながら、1) では、汚染された環境空気をを用いると意図するより高いCO₂濃度となってしまう。2) の場合も水槽そのものが規定濃度に平衡になっているかの常時計測が行われている実験例はない。3) の場合は、一定のpH維持が可能とはいえ、海水スケールでの精度管理は困難で、CO₂分圧を直接に計測制御するのに比較してCO₂分圧上昇の直接的表現でない。

そこで、国立環境研で開発してきた海洋観測用CO₂分圧計測装置の技術を応用し、臨海施設で供給される海水のCO₂分圧を計測しながら、実際のCO₂分圧に対する平衡濃度よりCO₂濃度を高めた空気をCO₂ゼロ空気と純CO₂ガスの混合によって生成して水槽をバブリングするという進んだ制御飼育装置のプロトタイプを製作した。装置は京大瀬戸臨海実験所で試験運転した。供給海水のCO₂分圧を実際に計測しながら一定値のCO₂分圧を高めることで日周変動も模擬でき、このことは沿岸海洋CO₂分圧の近未来をシミュレートすることになると考えた。しかしながら、結果（サブテーマ1 報告参照）として水槽をCO₂濃度調整空気バブリングするだけでは平衡到達が困難であることが明らかになり、目的のCO₂分圧に到達することを正しく保証できる装置とならなかった。また、ゼロCO₂空気をCO₂吸収剤（ソーダライム）で調製したため、吸収剤の頻繁な交換が必要となり、保守性能にも問題があった。これらの問題を経験したことで装置設計を見直し、新たな海水のCO₂分圧制御装置においては、根本的な制御機構の変更、すなわち、所定のCO₂分圧をもつ海水を溶解装置で作ってから飼育水槽に送るという変更を行った。

これまでは水槽中におけるバブリングで所定のCO₂分圧をもつ海水を作ろうとするのが通常の方法であったが、ここでは所定のCO₂分圧を持つ海水を水槽とは別の溶解装置で作ってから飼育水槽に送るという、違う発想の制御機構を持つ精密な海水のCO₂分圧制御装置を、本プロジェクトのために設計・製作し、各参画機関に設置して生物飼育実験に使用することとした（図1、2）。CO₂濃度を調整したガスを溶解する装置で調整した海水のCO₂分圧が常時計録される上、供給海水のCO₂分圧も計測するので、供給海水のCO₂分圧変動がCO₂分圧を調整した海水のCO₂分圧変動に影響することも把握できる。定めた一定値にCO₂分圧を制御するという基本的な機能に加え、一定の日周変化幅を与える機能、さらには、供給海水のCO₂分圧変動幅を計測した上で一定のCO₂分圧上昇を加えるという実日周変化模擬機能も用意した。CO₂分圧を高める飼育実験で実CO₂分圧を連続記録するような精密な実験例は極めて少なく、それを怠ると実験中の事故で水槽のCO₂分圧が一時的に上昇するようなイベントが見過ごされる。アクシデントで起こる高CO₂分圧パルスは飼育生物に大きなダメージを与えるるので、CO₂分圧連続記録は精密な飼育実験にぜひ必要である。

また、従来から外洋域のCO₂分圧は、海洋CO₂フラックス把握のために精力的に計測されてきたが、沿岸域のデータは不足している。供給海水のCO₂分圧を計測しながら濃度制御する本装置によれば、沿岸海域の自然のCO₂分圧変化の通年データが得られる。これは、沿岸域に生息する生物が自然に受けているCO₂分圧変動として影響評価に有用である。参画した4ヶ所の実験所（塩釜、横須賀、白浜、瀬底）における観測データがそろったので、沿岸海域におけるCO₂分圧の季節変化や日周変化の解析を行った。

4. 結果・考察

(1) 製作した海水CO₂分圧制御装置

図1に海水CO₂分圧制御装置全体の概念図を、図2にCO₂を海水に吸収させる吸収塔(dissolution tower)と水槽に供給する海水のCO₂分圧を測定する平衡器に相当する計測塔(measurement tower)の製作図を、図3にCO₂吸収塔・計測塔の概念図を、図4に装置の設置写真を示す。CO₂分圧の単位は μatm であるべきだが、厳密さを避け計測装置の読みである平衡空気の乾燥状態でのCO₂モル分率(xCO₂; この分野ではCO₂モル分率をエックスCO₂と呼ぶ)の単位であるppmの表現で代用する。

プロトタイプの実験から、通常の飼育用角型水槽とバブルストーンとの組み合わせではCO₂溶解の効率が不十分であり、供給空気に近いCO₂分圧まで水槽のCO₂分圧を高めることが困難とわかった。そのため、バブリング距離が長くとれるように細長い筒の下からCO₂濃度を高めた空気をバブリングしCO₂溶解の効率を高める方式とした。結果として、長ければ長いほど溶解の効率が上がり、2 mより背の高い管を用いるのが理想的とわかったが、実験室設置を考慮して1.6 mのバブリング長として装置高を1.78 mとした(図2)。CO₂濃度調整空気の調製には、小流量(20 mL/min)の純CO₂ガス用と大流量(5 L/min)の希釈空気用の2つのマスフローコントローラを用いる。調整ガスユニットA、B(図1)それぞれに2系統収納し、4段階の濃度制御が可能である。希釈空気は圧縮空気をヒートレスエアドライヤ(図1の希釈ガス生成ユニット)で除湿して作る。ヒートレスエアドライヤは、2筒のモレキュラーシーブカラムの加圧・減圧を交互に繰り返し、加圧空気中の水分を除去

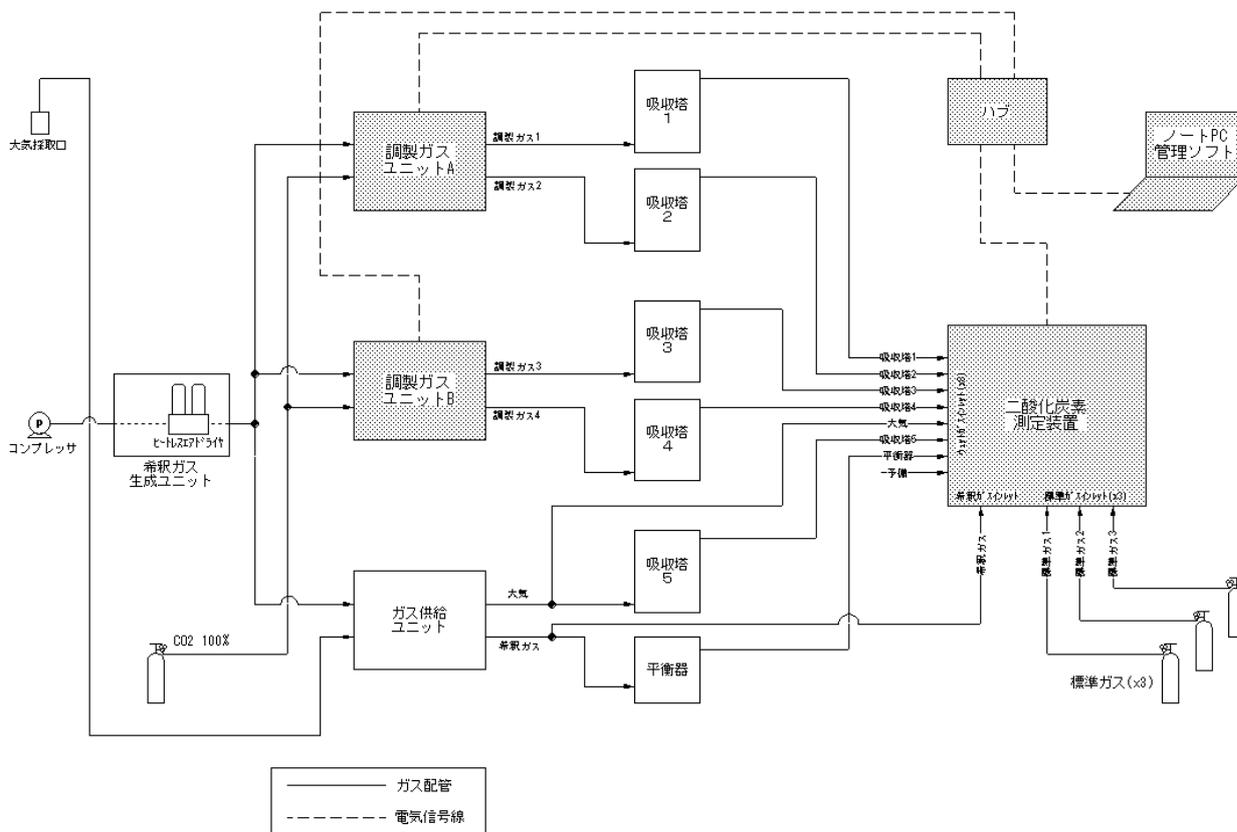


図1 本研究プロジェクト用に開発した海水のCO₂分圧を制御して海洋生物を飼育する装置のダイアグラム。

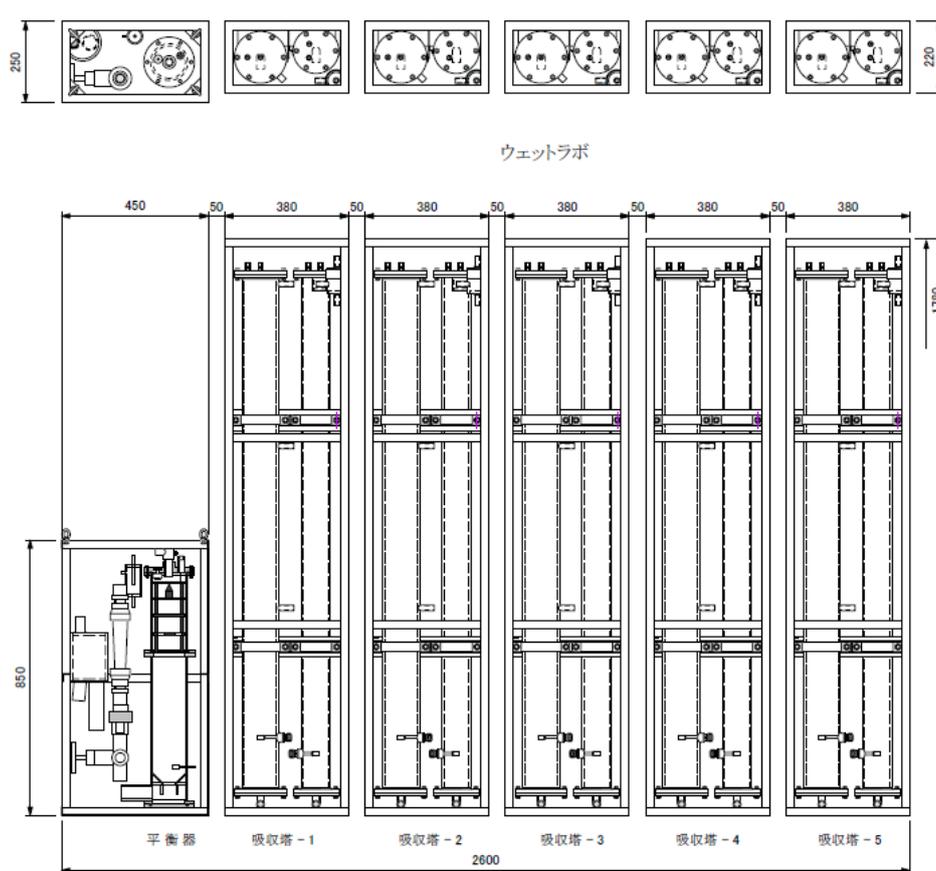


図2 供給海水CO₂分圧計測用平衡器（左端）、吸収塔（太い溶解塔と細い計測塔のペアを5連用意した）の製作図。

する装置で、同時にCO₂濃度も低下する。低流量で用いると50 ppm以下まで空气中CO₂が除去されるが、規格上限に近い大流量で使用するため150 ppm程度CO₂が残留する。残留CO₂濃度を制御するのは困難であるので、プロトタイプではソーダライムでCO₂を完全除去していた。これには、定期的な吸収剤交換作業が必要となり手間のかかる作業であった。そこで本装置では、除湿空気（希釈空気）CO₂濃度を計測し濃度値を計算に用いて混合する方法で、希釈空気と純CO₂ガスそれぞれの流量を決め、目的濃度のCO₂を含む空気を調製する制御方式とし、保守性を高めた。

図1のCO₂測定装置は、ガス中CO₂を定量するLI-840型（LI-COR社製）非分散赤外分光計と12方切り替えバルブを備えた装置主要部である。標準ガス3系統（ゼロ空気、400 ppmおよび2000 ppmのCO₂を含む空気の3種）を検量に用いる。CO₂濃度制御した空気を吸収塔1－吸収塔4で溶解してCO₂分圧を高めた海水のCO₂分圧、大気を吸収塔5で溶解しほぼ大気平衡とした海水のCO₂分圧、環境大気のCO₂濃度、供給海水のCO₂分圧、希釈ガスのCO₂濃度、予備入力ポートの9種のガスCO₂分析が一巡のシーケンス制御のもとで可能となった。

図3の吸収塔（左の筒）では、向流溶解の原理に基づき、上から下へ流下する海水に対し、下から上に空気をバブリングする仕組みで溶解の効率を高めている。本装置の大きな特徴は、計測塔（右の筒）であり、下から上に流れる海水に対して空気を下から上にバブリングし、流出する空気のCO₂濃度を計測することで、飼育装置に送られる海水が到達したCO₂分圧が計測される。チ

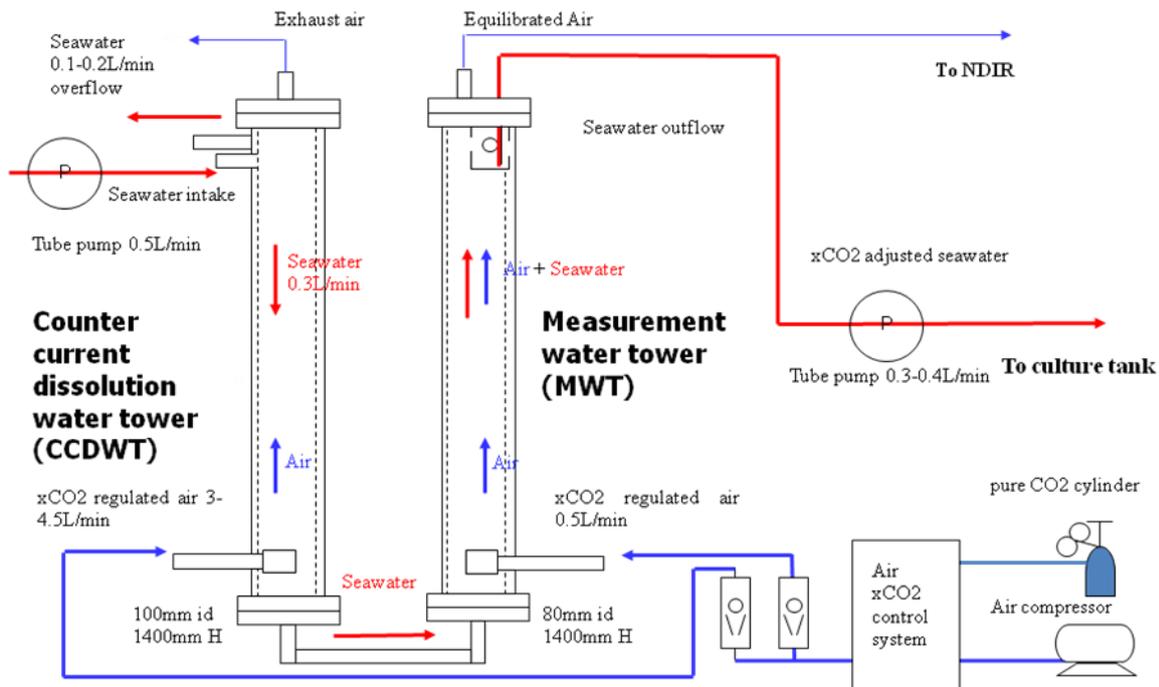


図3 溶解塔(Dissolution tower)と計測塔(Measurement tower)の概念図。

ューブポンプで吸収塔に0.5 L/minの流量で海水を供給し、計測塔から0.3-0.4 L/minの流量で排出させて塔内に海水の流れを作る。海水の一部を吸収塔の上からオーバーフローさせて液面高を一定に保つ。溶解塔から海水を取水するところに設けた泡除けで水槽に供給する海水の気泡を除く。溶解塔の効率を上げ、計測塔の計測応答速度を高めるために、溶解塔を太くし計測塔を細くした。

国立環境研の海洋観測では表層海水のCO₂分圧計測のためにバブリング型から改良した気液平衡器（タンデム型）を用いているが、本装置の溶解塔の原理と共通点と相違点がある。バブリング平衡器では、気泡の内圧は静水圧より表面張力の分だけ高く、CO₂分圧を計測する平衡器としてはプラスの偏差を生むことがわかっている。ただし、その程度はCO₂分圧の1%以下であり、酸性化飼育実験で問題にする必要のない誤差である。海洋観測用平衡器では偏差を解消する後段平衡器を加えるが、図3の計測塔には後段平衡器を加えていない。海水と空気の流れが向流でなく平衡器としては不利な設計であるが、飼育実験に供する海水のCO₂分圧を10 ppm程度の正確さで計測するには十分である。

バブリングによる気液交換は、よく用いられるシャワー型平衡器より効率が高く、1 m程度の長い筒を用いれば、下から上に空気を通過させるだけで、海水CO₂分圧と大きく変わらないCO₂濃度の空気を送る限り、空気と海水のCO₂平衡をほぼ到達させることができる。ただし、正確な気液平衡器とするには、平衡器中の気液比率を小さく、すなわち、大きな液相と小さな気相の体積比とすべきである。また、海水の流量はできるだけ大きく、応答速度を落とさない範囲で空気の流量はできるだけ小さくするのがよい。これは、バブルリング空気が海水を通過しても、海水中のCO₂

量をできるだけ変化させないようにするためである。ところが、溶解塔では海水のCO₂分圧よりはるかに高いCO₂濃度の空気を送り海水中のCO₂分圧を高める必要から、気液比を逆に大きくする必要がある。すなわち、筒内の海水体積と流量を小さくし、バブリング空気量を大きくすべきである。しかしながら、空気量を大きくするには、大型のコンプレッサを使い、ヒートレシドライヤを大流量規格とし、ガス混合部のマスフローコントローラも大きくしなくてはならない。実験室設置の可能性（電



図4 CO₂分圧制御飼育装置の設置写真。

気容量）と経費を考慮し、濃度調整空気流量を5 L/minとし4段階のCO₂濃度を調製する設計とした。バブリングガス流量に対応して筒の径を小さくする限界があり、バブリングガス流量（溶解塔4.5 L/min、計測塔0.5 L/min）に合わせて吸収塔の径を決めた。

さらに、実験で得たCO₂分圧計測の結果から、供給可能な海水量が決められた。飼育実験にはCO₂分圧調整海水をできるだけ大流量で得たいが、供給海水量を大きくすると到達平衡度が下がる。実験の結果、海水CO₂分圧を1000 ppm高くして90%の応答を保証する限界が、0.3-0.4 L/minの海水流量とわかった。バブラーの種類で到達平衡度に多少の差があり、理化学用と一般水槽用のバブラー数種を比較して、保守経費の安い一般品の中から効率の良いものを選定した。ただし、最終的には、各機関での運転経験を踏まえ、塩のつまりが少なく洗浄もしやすいタイプを選定した（サブテーマ3報告参照）。

（2）CO₂分圧制御装置の性能と飼育実験での使用方法

マスフローコントローラの流量比によると、供給海水のCO₂分圧から0-4000 ppmの範囲でCO₂を高めた空気を生成することができる。しかしながら、1.6 mのバブリング長の吸収塔で約90%の応答であることがわかり、結果として、生成海水のCO₂分圧計測値を見ながらバブリングするCO₂濃度を定めるのが現実的であるとわかった。一方、原海水のCO₂分圧が高い時に低いCO₂濃度の空気でバブリングして低いCO₂分圧を得るのは困難とわかり、原海水のCO₂分圧が高い場合には、事前の曝気が有効であるとわかった。設置においては、原海水を容量の大きいバケツにかけ流し、環境空気をポンプで供給して大流量バブリングを行い、おおむね大気と平衡のCO₂分圧に近づけてから供給するのが、安定なCO₂分圧の海水を得るのに都合がよいとわかった。この予備平衡操作により、水槽のCO₂分圧を一定に保つ能力が高まる。ただし、CO₂分圧を低下させる方が上昇させるより困難なことは、単位pCO₂変化に必要な全炭酸量の変化量が高いpCO₂より低いpCO₂で大きいことが化学平衡からわかっている。このことがバブリングでpCO₂を低下させることを困難にしている

理由の一つであろう。

大気平衡に近づけた原海水を供給する方法で、吸収塔 5 で得られる海水はおおむね現在の大気平衡（400 ppm前後）となる。CO₂影響が未知の生物のCO₂感受性を試すような実験では、吸収塔 5 で得られる大気CO₂と平衡になった海水をコントロール（対照）水槽とし、1000 ppm程度までの間の 4 濃度で影響実験を行うのが、本装置を用いる標準的方法である。一方、原海水が大気平衡に近い条件で吸収塔を希釈空気（CO₂濃度150 ppm程度）でバブリングすると、CO₂分圧が250-300 ppm程度に下がることがわかった。これを利用すると吸収塔 1 から吸収塔 4 のうちのひとつを希釈空気バブリングすることで産業革命以前に近いCO₂分圧の海水が得られ、CO₂に対する感受性が高いとわかっている生物の飼育実験においては、それをコントロールとするのが良いと考えられた。また、日周変動を模擬するモードも良好な動作が確認され、本プロジェクト 3 年度においては、いくつかの参画機関における飼育実験に利用されるようになった。

（3）CO₂分圧調整装置の性能評価試験

図 3 が、飼育海水のCO₂分圧を調整する装置の、海水にCO₂濃度を制御した空気を吹き込む系の模式図である。左側を溶解塔、右側を計測塔と呼んでいるが、溶解塔では上から下の方向に海水が流下し、計測塔では下から上に海水は移動する。これは、計測塔の上端から海水をペリスタポンプで吸引しているためである。一方、CO₂濃度を制御した空気は溶解塔の下から上に自らの浮力で浮上する。計測塔でも、同じくCO₂濃度を制御した空気が下から上に浮上し、水面から出る空気の一部が計測装置に引き込まれて、溶解塔と計測塔でCO₂濃度の調整がなされた海水の平衡CO₂分圧が計測される。溶解塔ではCO₂調整空気と海水との分圧差を解消するように多くのCO₂を送り込むために、4.5 L毎分と大きな流量にしている。計測塔では、小さい空気流量（0.5 L毎分）でCO₂調整空気を送り込むことで、塔の水面から出た空気が海水と溶存CO₂ガスが平衡に到達しやすくしてある。

参画機関の実際の実験で、海水の全炭酸とアルカリ度を計測し、CO₂分圧を計算で求める試験を繰り返したところ、計測塔の計測値とCO₂分圧計算値が100 ppm程度の差を持つことがしばしばあり、計測塔の計測値がどの程度確からしいかを評価することが必要となってきた。そこで、このような濃度調整系が一つの装置に4系統あることを利用して、正確さの確認実験を行った。実験所では、原水の濃度が時間変化するため、装置の性能を安定に評価するために、工夫が必要である。まず、4系統のうちの系統 2 と系統 3 を利用して、計測塔の流出水（0.3 L毎分）を5 L程度のタンクに送りオーバーフローさせた。このことで、例えば1000 ppmのCO₂分圧におおむね調整された海水が安定に作られる。そのオーバーフロータンクを系統 1 の原水供給とし、系統 4 の溶解塔ガス系でやはり1000 ppmの空気を送り込む。このことで、溶解塔と計測塔の結合部（計測塔の水の源頭と呼ぶ）の海水CO₂分圧は約1000 ppmにおおむね安定に保たれるはずである。この状況の下で、系統 1 のガス制御系を利用して、計測塔のバブリングガスの濃度を約600から1600 ppmの範囲で可変した。例えば、618, 615 ppm（校正值）で計測塔下からバブリングした時の水面から出る空気のCO₂濃度は879, 878 ppmであった。また、1594 ppm（校正值）でバブリングした時は1251 ppmであった。バブリングガスのCO₂濃度に対して水面から出る空気のCO₂濃度をプロットすると、1000 ppm付近で両者が一致する点が見出される。これは、源頭のCO₂分圧とバブリングガスのCO₂分圧が一致した時に、計測塔の中でのCO₂気液平衡が下から上まで一様に保たれるものと考えることが

できるので、この点のバブリングガスのCO₂濃度が源頭のCO₂分圧を示す。この値は1027 ppmであり、CO₂濃度調整装置のマスフローコントローラの不確実性(5%)の範囲内で確からしいものであった。これがわかると、計測塔で起こるCO₂のマスバランスを全炭酸変化の計算から確認することができる。すなわち、海水のCO₂分圧より低い空気でもバブリングすると、海水から空気にCO₂が移動し、空気のCO₂濃度が高まり、海水のCO₂分圧が下がる。逆に、海水のCO₂分圧より高い空気でもバブリングするとその逆の関係である。源頭のCO₂分圧が与えられたことで、計測塔内のCO₂収支を計算することができ、102±6%でその収支計算が合致した。このことは、計測塔の働きが十分に把握されており、計測塔の水面から出る空気の計測値が調整海水CO₂分圧を正しく反映したものであることの証拠となった。

すなわち、本装置で実験を行った場合の調整海水のCO₂分圧は、計測塔の計測値を信頼してよいと確認された。ただし、この実験の過程で、マスフローコントローラは保証の範囲の精度でしかなく、真の流量を求めるためには、検定実験が必要であることが明らかになった。ガス分析に用いている赤外分光光度計の繰り返し再現性として0.1%程度が得られるので、それを用いると検定ができる。白浜実験所で試したところ、保証精度の範囲であったが2%程度の流量偏差があり、正確な実験のためには検定が必要とわかった。上で述べた収支計算の結果は検定後のマスフローコントローラで求めたものである。また、源頭のCO₂分圧を求める方法がわかったことで、装置のバブラーが能率低下していた場合や、全体の海水流量が変化した時などの収支を求める実験など各種実験を行ったが、いずれの場合でも、バブラーの効率の変化がマスバランスに及ぼす影響は小さく、計測塔の計測値を供給海水のCO₂分圧としてよいことが化学実験として明らかにされた。

ただし、計測塔上端でCO₂分圧が決定されているものの、海水の移送ラインで温度が変化したり、管内や飼育装置内に有機物の汚れがあってCO₂分圧が高まる可能性は否定できない。このことを避けるためには、実験時の温度変化を起こさない管理、および、供給水（計測塔上端から出たすぐの水）と飼育装置内の水の全炭酸を比較し変化がないことを実験期間中確かめることが安全策として推奨される。

(4) 従来のCO₂分圧制御飼育実験を模擬した実験

本装置には、任意のCO₂濃度4段階の空気を調製して送出することができ、切り替えバルブから吸引する空気のCO₂濃度を順次計測する能力がある。これを応用すると、これまでの単純なバブリングによる海洋生物のCO₂分圧制御飼育実験を模擬し、海水中の実CO₂分圧がどの程度か推定する実験が可能である。実験は、京大瀬戸臨海実験所で実施した。CO₂分圧調整飼育実験には図5(a)、(b)に示す静止水実験(a)とかけ流し実験(b)がある。CO₂濃度を高めた供給空気でもバブリングして原海水よりCO₂分圧を高めた状況を考えた場合

$$\text{供給空気CO}_2\text{分圧} \quad >= \quad \text{表面から逃げる空気CO}_2\text{濃度} \quad >= \quad \text{水槽CO}_2\text{分圧} \quad (1)$$

であると容易に理解される。静止水実験では、CO₂濃度制御空気をバブリングし始めた時点では、=ではなく>である。十分な時間のバブリングを続けると、海水中全炭酸濃度が高まり、分圧差が次第に解消されて最終的にこれらの関係が=になる。空気の水蒸気飽和度や表面張力によるバブル内外圧力差などを考慮すると厳密に=にはなりにくいですが、数 μatm の差を許せば=としてよい。

しかしながら、どの程度の体積流量のCO₂濃度制御空気をバブリングすれば、この平衡が到達されるかを確かめるには、海水の全炭酸・アルカリ度を計測する方法があるとはいえ、同じ施設に装置があっても最短2-3時間後にしか結果が得られないし、他の施設に輸送して分析すると日単位の遅れになることから、容易な実験とはいえない。リアルタイムに結果を得るには、厳密に検定した海水スケールのpH測定（比色法が推奨される）が必要で、生物系実験室では困難を伴う。

今回は、水槽に気密な蓋をかぶせ、バブリングで流出する空気を本装置で計測して、平衡に到達する時間・バブリング空気量などを求めた（図5）。(a)の静止水実験では、角型ガラス水槽10 L：3台と60 L：1台に一

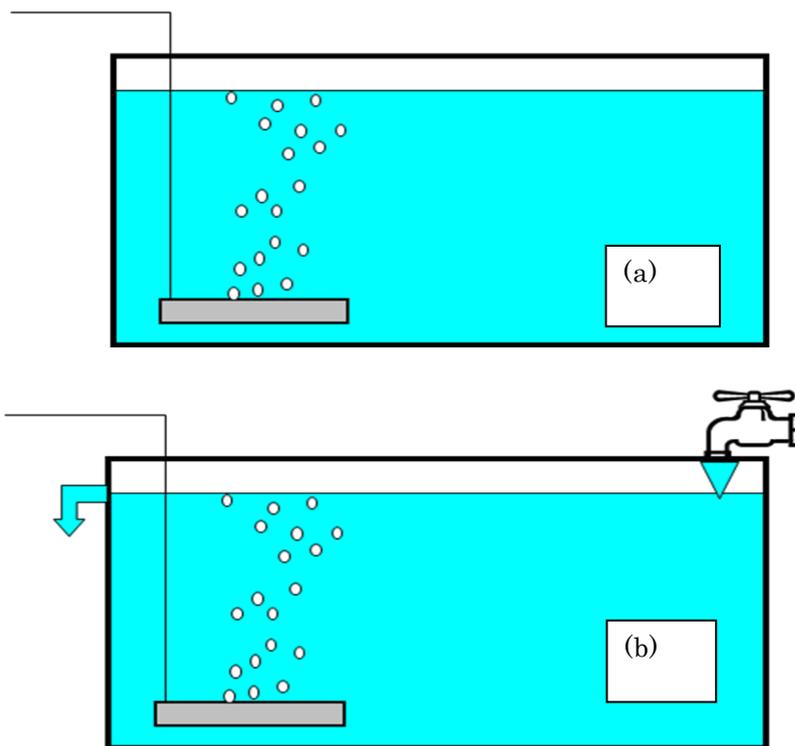


図5 CO₂制御飼育実験における静止水(a)とかけ流し(b)の概念図。

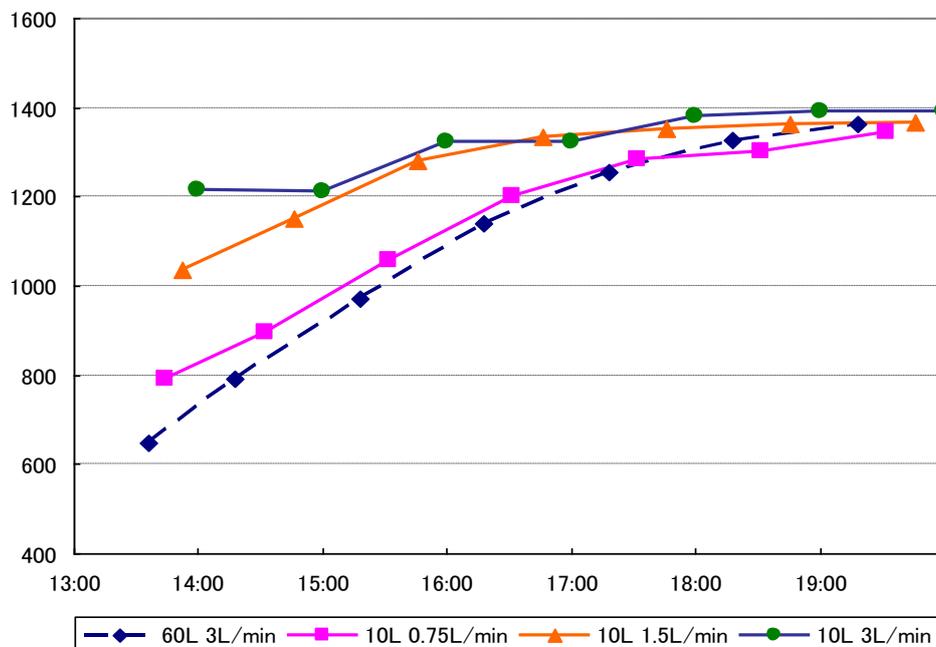


図6 静止水の水槽pCO₂分圧(ppm)到達実験結果（60 L水槽と10 L水槽の結果）。

一般用バブルストーンを入れ、0.75 L/minから3 L/minの流量でCO₂濃度を1400 ppmに制御した空気
 でバブリングし、原海水CO₂分圧の450 ppmから始め、1時間毎に水面から逃げる空気のCO₂濃度
 が上昇してゆく様子を計測した。海水のCO₂分圧が平衡に到達するまでは、表面から流出する空気
 中のCO₂分圧は海水のCO₂分圧より高いが、平衡になれば海水のCO₂分圧と等しくなる。10 L水槽
 に対して0.75 L/minは穏やかなバブリングで生物飼育に適するが、3 L/minは過剰なバブリング量
 である。実験では海水CO₂分圧の平衡到達を早めるため、過剰なバブリング量でも行った。図6
 がその結果であり、大きな空気流量で平衡到達が早く、小さい流量あるいは同じ流量では大きな
 水槽で到達が遅くなる。しかしながら、どの条件でも水槽体積の30-60倍をバブリングすると、
 平衡到達度は95 %以上となった。この知見は、計測装置がない実験に重要な示唆を与える。
 すなわち、静止水飼育実験を開始してよいタイミングを示す。水槽の深さ、ストーンから出る
 泡の径など、結果を左右させる因子があるが、示されたバブリング空気量の目安は重要な情報
 である。例えば、60 L水槽と7 m³のボンベ詰め標準ガスによる実験を想定すると、95 %到達
 までにボンベの約半分のガスを消費させるべきで、残りのガスの持続時間しか飼育実験は行
 えない。

一方(b)のかけ流し実験では、海水は供給される空気中のCO₂濃度に対して決して平衡に
 ならない。水槽にはCO₂濃度制御空気より平衡CO₂分圧が低い海水が常時供給されている
 ので、上式は決して=にならず>の状態が維持されるのである。供給海水のCO₂分圧とアル
 カリ度が一定ならば、実験開始からある時間後にバブリング空気供給による海水全炭酸
 増加とかけ流し海水による全炭酸希釈とがバランスし、海水は定常のCO₂分圧になる。
 実験はそれを模擬することを狙ったが、静止海水実験より複雑である。すなわち、海
 水のCO₂分圧が定常になった時点でも、表面から逃げる空気のCO₂分圧は海水より高
 いので到達海水のCO₂分圧を知ることができない。そこで、水槽のCO₂分圧と表面
 から逃げる空気のCO₂分圧を近づけるために、計測時のみバブリングする空気の流量
 を下げるとともに、CO₂濃度制御機能を使って海水CO₂分圧と近い濃度の空気を送
 って計測した。その場合、表面から逃げる空気のCO₂分圧は海水CO₂分圧に近づく
 が、一方で海水に空気から加える単位時間当たりCO₂量が低下し、流入してくるCO₂
 分圧の低い原海水による希釈が強まり、海水中CO₂分圧はバブリング空気流量が大
 きい時より次第に下がってゆく。

そこで実験では、60分の周期のうちの45分

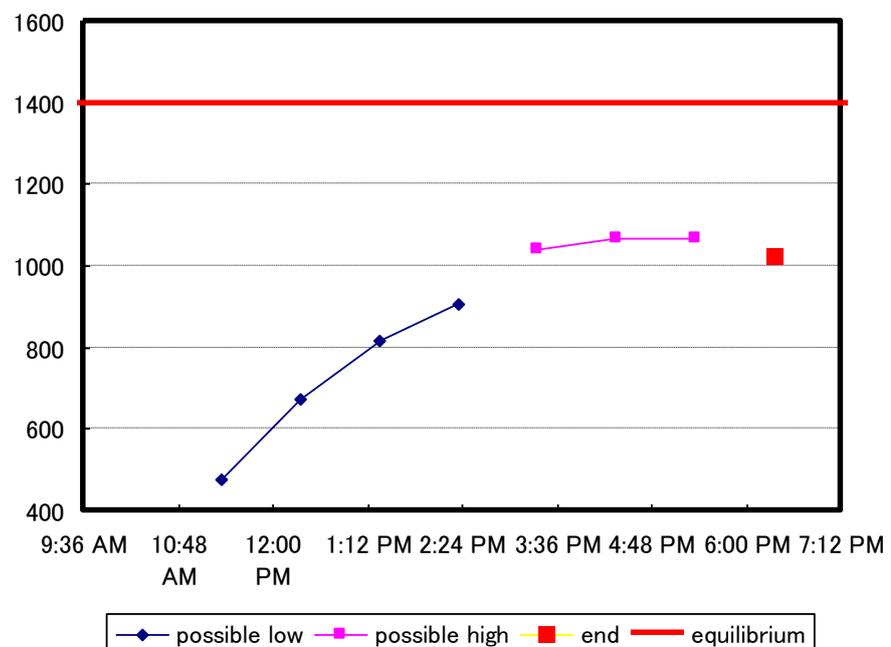


図7 かけ流し水槽のCO₂分圧(ppm)到達実験結果 (60 L水槽の例のみを示す)。

間は60 L水槽で3 L/min、10 L水槽で1.5 L/minという大きなバブリング量を維持し、4つの水槽からの流出空気を切り替えながら順次計測する各15分間だけ0.5 L/minにバブリング空気流量を絞り、海水CO₂分圧を計測した。3台の10 L水槽でかけ流し水量を変え、海水滞留時間を3、1、0.4時間とした。60 L水槽の滞留時間は2.5時間とした(図7)。実験中原海水CO₂分圧は約500 ppmで、1400 ppmにCO₂濃度を制御した空気バブリングする実験とした。8時間の実験のうち当初の4時間は、計測する15分間だけバブリング流量を絞るかつバブリング空気のCO₂濃度を500 ppmもしくは1時間前の計測値程度に下げて計測した。この測定値は水槽の実CO₂分圧より低い(下限)と考えられる。5時間後からは、海水のCO₂分圧がかけ流し条件の定常CO₂分圧に近づいたと考え、バブリング空気流量を絞らず、1400 ppmのCO₂濃度空気バブリングする状態を維持して計測した。この測定値は水槽CO₂分圧より高い(上限)と考えられる。8時間後にかけ流し水を停止し、1時間前計測値と同じCO₂濃度空気を小流量(0.5 L/min)でバブリングし、定常CO₂分圧を推定した。

表1 かけ流し条件で水槽が到達した定常CO₂分圧

水槽サイズ	かけ流し流量	海水滞留時間	到達定常CO ₂ 分圧	到達度
60L	0.396 L/min	2.5 h	1022 ppm	58 %
15L	0.055 L/min	3.0 h	1317 ppm	91 %
15L	0.132 L/min	1.3 h	1157 ppm	73 %
15L	0.396 L/min	0.4 h	815 ppm	36 %

原海水CO₂分圧は実験中約500 ppmが保たれていた。バブリング空気CO₂濃度は1400 ppmに制御した。到達度：原海水CO₂分圧(500 ppm)から900 ppm上昇し、バブリング空気のCO₂分圧と等しくなると100 %。

結果(表1)からかけ流し条件では、海水の滞留時間が短い場合に希釈効果が強く効き、平衡到達度が低くなることがわかった。単純な水槽バブリングによるCO₂制御法では海水の実CO₂分圧計測が困難であり、設定分圧差が大きいかけ流し実験では正しい海水CO₂分圧が実現されていなかった可能性が危惧される。簡単なモデルで考察し、次式の表現を得た。

$$\alpha = \frac{I}{I + \Delta C / (t \cdot \beta)} \quad (2)$$

ここで、 α は平衡到達度であり1.00が100 %平衡到達である。Iはmol/hで表す過剰CO₂供給量(原海水と供給空気のCO₂分圧差に相当する全炭酸がすべて海水に供給されるとした場合の全炭酸供給量)、 ΔC はmolで表す供給空気CO₂分圧まで水槽海水の全炭酸を高める全炭酸量、tはhで表す海水滞留時間、 β は水槽の形状など溶解効率を示す係数(無単位)である。上記4通りの実験結果を式に入れて比較すると、実験結果で得られた α を表現できた。すなわち、標準形状の角型水槽で一般用バブルストーンを使った場合に、溶解効率 β は1.5程度でほぼ一定であった。この式から、計測装置がない場合の実験で1にできるだけ近い α を得るための条件が明らかになった。すなわち、tを無限大にする(海水の滞留時間をできるだけ長く、少ないかけ流し量にする)、Iを無限大にする(供給空気流量を大きくする)、 ΔC をゼロに近くする(原海水CO₂分圧から高める分圧差を小さくする)、 β を無限大にする(水槽の背を高くしてバブリング長さを大きくしたり泡を細かくしたりする)ことが必要条件である。

この式の表現を通常行われているような水槽を空気バブリングする手法による飼育実験におけるgood practiceとして表わすと：

- ・ かけ流し流量を減らすのが正確な実験の必要条件であるが、減らせるかどうかは飼育生物を健

康に保てるかどうかで決めるべきである。

- ・供給空気流量を大きくするのが正確な実験の必要条件であるが、大きな空気流量は水槽内に過剰な泡をもたらし、飼育には適当でなくなる。

- ・かけ流しでは原海水からの分圧差をむやみに大きくすることは望めないで、大きな分圧差が必要な場合には、予備的に分圧を高めた（低めた）海水を用いるべきである。

- ・バブリングの効率は浅い水槽より深い水槽の方がよい。

というようになり、これらの点を考慮して、通常水槽での実験を改善すべきである。

（5）CO₂分圧調整装置の運転で得た沿岸海水のCO₂分圧変動

本研究のために開発したCO₂分圧調整装置は、既に記したように供給海水の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のプロットのためには、日内の周期的変動から最大値と最小値と日平均値が算出できるだけの運転時間のある日（概ね20時間以上の運転データを取得した日）のデータを残し、施設のタンク洗浄など外的変化要因が無く、データチェックの結果として日周変化計測値に合理性が見られる日だけを計算に用いた。図8には、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。装置の運転状況の記録として、CO₂分圧計測値以外の多くのパラメータが残されているので、それらをチェックすることで運転の適切さがわかる。そこで、各実験所の装置の全利用期間のデータを検証し、信頼できるデータ区間のみを抽出して運転による誤差を除く努力をした。

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、横須賀と白浜で日変動幅が大きい。ただし、塩釜でもCO₂分圧が低く安定した時期には小さい日変化が見られた。各機関とも午前から昼に最高値、午後から深夜に最低値を示した。このことは日周変動の最も大きな支配要因が、植物の光合成と生産された有機物の分解であることを示唆するものである。臨海施設では、地先の取水施設からくみ上げた海水を一度貯留して実験や飼育に供給しているため、供給にはある程度の時間遅れが加わる。夜間の分解の影響が最大となるのが明け方であってもCO₂分圧最大値が午前前から昼になること、昼の光合成の影響が最大となるのが昼過ぎであってもCO₂分圧最小値が夜から深夜になることがあり得る。また、白浜では1日1周期と並んで1日2周期成分が大きく、潮

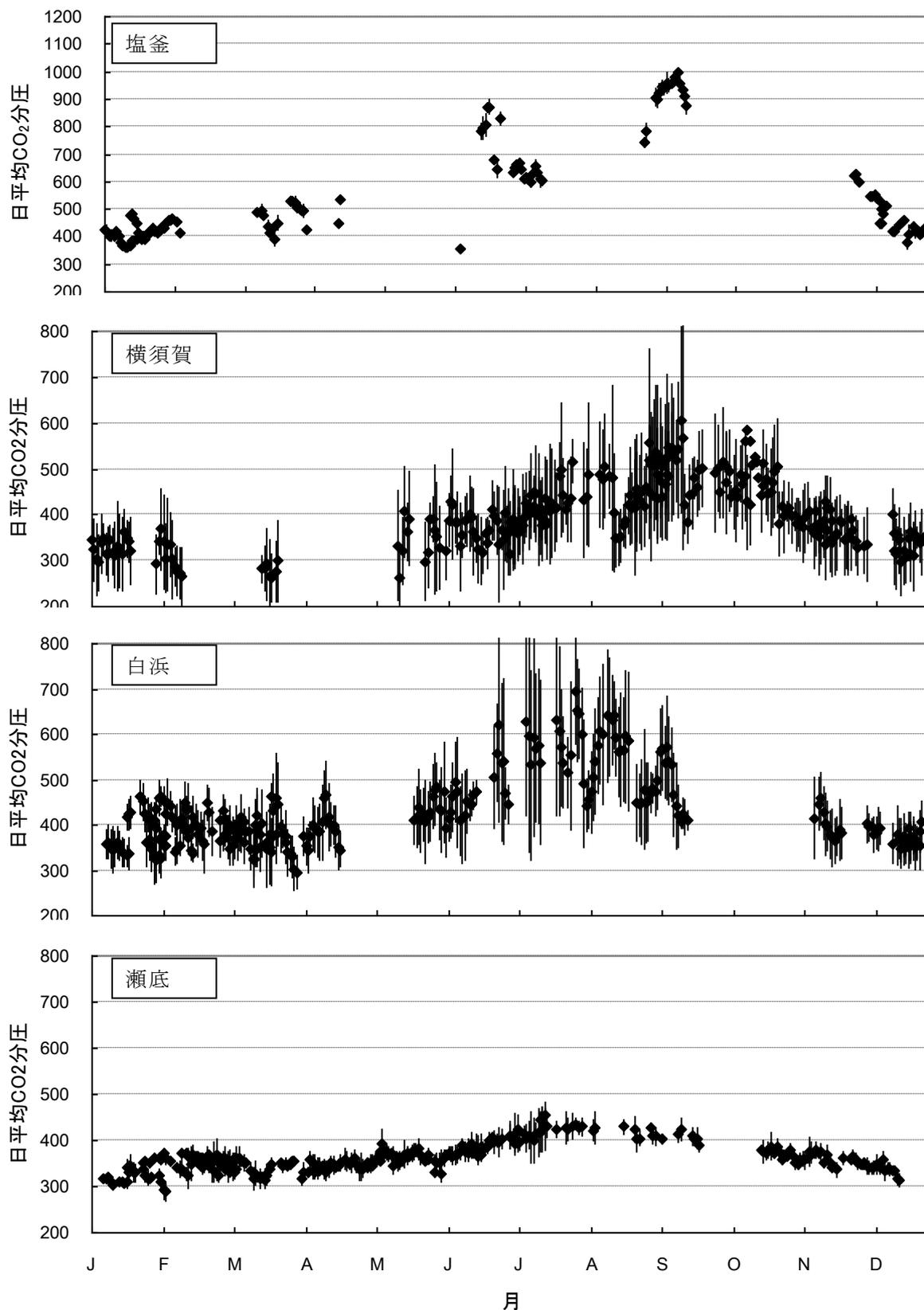


図8 参画施設の飼育用海水供給水のCO₂分圧変動、横軸2008年11月～2011年3月の各年を重ねてプロット、上から：塩釜（東北区水産研究所）、横須賀（中央水産研究所横須賀庁舎）、白浜（京都大学瀬戸臨海実験所）、瀬底（琉球大学熱帯生物圏研究センター）

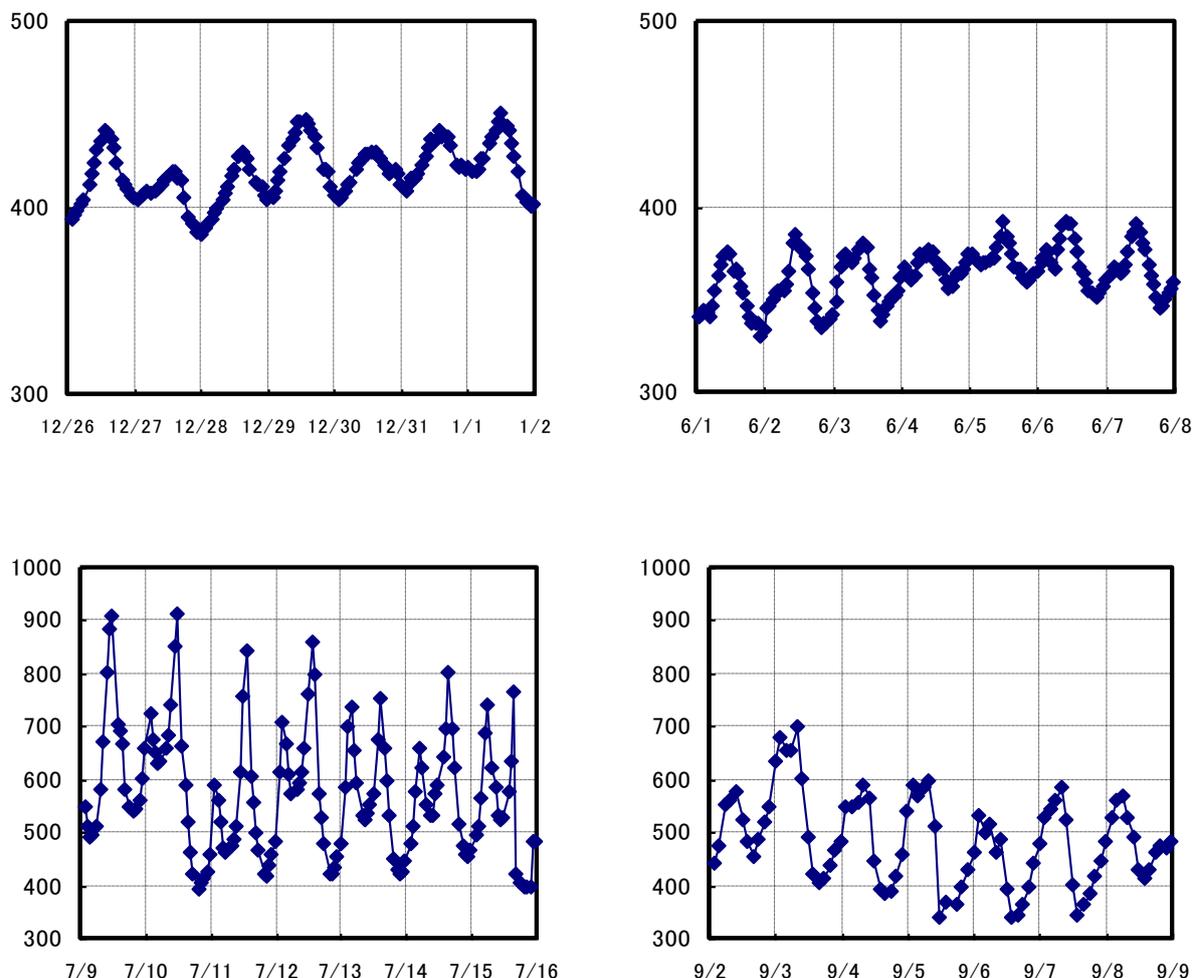


図9 参画機関臨海施設の飼育海水供給水に見られた日周変動の例、縦軸 $p\text{CO}_2$ (ppm)
 左上：塩釜（東北区水産研究所）、 右上：瀬底（琉球大学熱帯生物圏研究センター）
 左下：白浜（京都大学瀬戸臨海実験所）、右下：横須賀（中央水産研究所横須賀庁舎）
 縦軸スケールが上は200 ppm、下は700 ppmであることを注意。

汐影響が加わっていることがうかがえ、他の3実験所では1日2周期の成分は大きくなかった。

図9は各参画機関の臨海実験所で得られた日周変動の例であり、横須賀は月平均日周振幅の最大値（230 ppm）に近い2009年9月のデータを、白浜も月平均日周振幅の最大値（320 ppm）を示した2010年7月のデータを選んだ。塩釜と瀬底は年間を通じて日周変動は小さいのであるが、それぞれ日周振幅が50 ppm程度と年平均よりやや大きい時期の例である。図10には月毎の平均 CO_2 分圧（日平均 CO_2 分圧の月平均で算出した）と日周変動幅（最大値マイナス最小値）の月平均を、4箇所の臨海実験所について示した。

塩釜では、リアス式の海岸から急に深くなるような箇所に採水口があるが、近隣には有機物汚濁が大きい港湾がある。8-10月にかけて1000 ppmを越す著しく高い CO_2 分圧が観測されるので飼育実験に適当ではなく実験が実施できなかったためにデータは少ない。しかしながら、冬の CO_2 分圧が400 ppm程度まで下がることは毎年再現した。塩釜では6-7月に既に高い CO_2 分圧となる

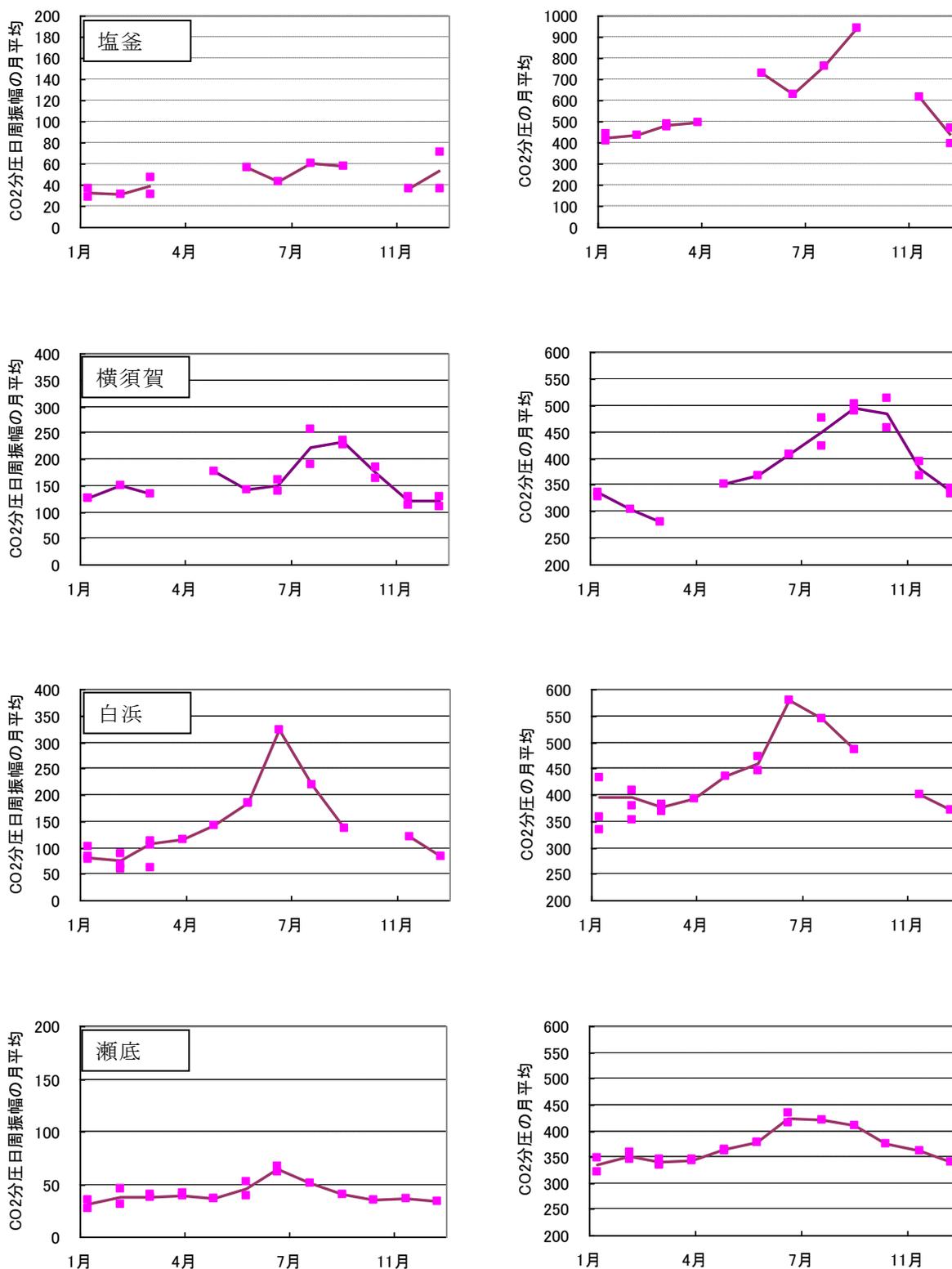


図10 参画施設の飼育用海水供給水のCO₂分圧の月平均、左：CO₂分圧の日周振幅（最大値－最小値）の月平均、右：CO₂分圧の日平均の月平均、上から塩釜、横須賀、白浜、瀬底、2008年11月～2011年3月の各年の月を重ねてプロットした。

兆候が見られ、月内でもCO₂分圧変動が著しく大きかった。塩釜で日周変動がきれいな三角関数的変化になる時期は多くはなく、図9に示した変動例は規則性のよい日周変動を選んだものである。塩釜での給水箇所は、3箇所の中で最も内湾的で港湾地域の影響を受けやすい場所であり、夏の一次生産が大きい時期に有機物負荷が蓄積し、秋にその分解が最大となることが考えられる。有機物負荷が水平的に移流してくるとすると、現場水塊そのものでの生物生産が大きい場合と違い、日周変動幅を大きくしないものと考えられる。また、他の施設に比べて採水口の水深が大きいため、付着性の大型藻類・海草と浮遊性藻類を合わせた総光合成が水柱CO₂分圧に及ぼす影響が小さくなるものと考えられる。塩釜では有機物負荷が原因となって、通年のCO₂分圧平均が、外洋域（特別な湧昇域を除くと年間平均では大気平衡に近い）よりはるかに高いものとなっているようである。

これに対し、横須賀では規則性のよい日周変化が見られることが多く、その幅はCO₂分圧値と相関がある。CO₂分圧の高い9月に振幅は最大値（231 ppm）を示し、CO₂分圧の低い12月に最小（119 ppm）を示した。横須賀の取水口は相模湾の沖合水に洗われる場所にあるとはいえ、水深が比較的浅く、周辺にはよく発達したアマ藻場がある。そのため、付着性藻類・海草の光合成が水柱の全炭酸を減らし呼吸を増やすことで日周変動を生み出す効果が大きくなると考えられる。夏の終わりから秋の初めのCO₂分圧が最大となる要因は、温度効果が大きく、汚濁負荷の影響は少ないものと考えられる。年間平均のCO₂分圧値は、大気平衡値に近い。

白浜も、規則性のよい日周変化が見られることが多く、横須賀同様にその幅はCO₂分圧値と相関がある。CO₂分圧値の最大となる7月に日周振幅も最大値(324 ppm)を示した。白浜の取水口の近隣の付着性藻類・海草の繁茂はさほどでないものの、取水口のある浅い入り江の周囲には良く発達した藻場があり、その間で水の流通が比較的良いものと考えられる。年間平均のCO₂分圧は大気平衡よりやや高く、取水タンクにおける滞留がCO₂分圧を高めている効果も懸念される。

瀬底の取水箇所は、海岸から沖合いに十分に離れた地点にあり、サンゴ礁の磯場とはいっても沖合水との交換がよい条件になっている。結果から、通年のCO₂分圧は大気平衡に近い、もしくは、やや低いと考えられた。2年度の報告書執筆段階では、実験所の装置の運転パラメータを精査することができず、多くの動作不良日があることがその後の検討で明らかになった。図8では運転不良日のデータが除いてあり、昨年版で見られたパルス的な高いCO₂分圧値が除かれ、夏の時期でもCO₂分圧があまり高まらないことがわかった。サンゴ礁のラグーンにおいて著しく大きなCO₂分圧の日周変動がある例も知られているが、瀬底実験所では外洋水との交換が良い取水口条件から、日周変動も年変動もともに小さいものとなっていると考えられた。

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。また、サブテーマ1と2の実験結果では、日周変化の最大値が生物の生長に与える影響が大きかった。図10の日周変動グラフは月平均値であり、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256 ppm±73 ppm、同じく白浜では2010年7月について324 ppm±116 ppm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るとしたら、横須賀と白浜での最大振幅の月についてそれぞれ±165 ppm（peak to peakは329 ppm）および±220 ppm（peak to peakは440 ppm）の日振幅、標準偏差の2倍の効果を実験で与えるとしたら±201 ppm（peak to peakは402 ppm）および278 ppm（peak to peak

は556 ppm)となる。例えば実際の生物実験が幼生を対象としているならば、発生する特定の月の変動を与えるべきと考えられるので、観測結果の相当する月のデータを検討して行うべきであろう。一方、長期に飼育する場合には最大振幅の月の幅に限らず振幅の季節変化も考慮する必要があるであろう。

本研究で生物飼育実験において与えるべき日周変化の適切な値を決めることができたとはいえないが、実験参画機関の一つ(サブテーマ1)が行っている±200 ppmの幅(振幅で400 ppm)は沿岸海洋で現実には起こっている大きめの日周振幅であることがわかった。参画機関の他の一つ(サブテーマ2)では±400 ppmの実験を行っていて観測地点の日周振幅よりかなり大きいものの、生物影響にCO₂分圧平均値が効くのか日周最大値が効くのかという判定にこのような誇張した実験が必要だったと理解している。とはいえ、過去の測定例で大型藻類(コンブ)の生育が著しい臨海実験所において光合成と呼吸の効果が大きく日振幅が1000 ppmにまでなったこともあり、ある種の沿岸海洋環境ではありえる状況といえるので、あながち誇張した実験ではないかもしれない。また、今回の参画機関でも塩釜や瀬底のように日振幅の小さい臨海実験所もあり、その周辺生物はあまり大きなCO₂分圧日周変化を受けていないとも考えられ、日周変動を与える実験はさほどの意味がないかもしれない。一方で、そのような地点でも岩礁の地形によっては局所的に比較的大きなCO₂分圧日周変動がある可能性もある。このようなところで生息する生物に意図的に日周変化を与える実験にはどのような意義があるのか、今後検討すべきであろう。

本課題で制作した制御装置には、CO₂分圧計測値に一定濃度のCO₂分圧をかき上げして海水のCO₂分圧を調整して飼育実験に供給する機能がある。これを用いると、供給海水の日周変化を維持しながら、コントロールとの間のCO₂分圧差を保つことができる。長期の飼育実験を行うには、特定の月のCO₂分圧振幅を与え続けるよりは、この手法の方がより現実海洋の将来の姿に近いと考えられ、今後の実験への活用が期待される。ただし、CO₂分圧日周振幅の小さい実験所と大きな実験所でその意味が異なるであろう。今回得た各実験所の供給水のCO₂分圧測定の結果は実験の予備検討に大いに役立つものである。しかしながら、世界の同様な実験を実施している実験所でこのような供給水のCO₂分圧計測を行っているところはほとんど無い状況であるのは問題であろう。これはCO₂分圧の計測がある程度の道具立ての必要な難しいものであることが原因で、簡易な測定器が求められている。本研究課題と並行してその開発を行っており、投げ込み式平衡器による可搬型の装置開発を行ったところであり、飼育実験のCO₂分圧管理に役立つものと考えている。

今回の観測値はあくまで臨海施設の供給水の計測であり、貯水タンクを経ての給水のために現場海水CO₂分圧変化を正確に反映しているとは限らない。今後は、沿岸海域のCO₂分圧変化の実計測を進めて生物へのCO₂影響評価実験へ結果をフィードバックする必要があると考える。その場合には、磯場における水平的なCO₂分圧分布を把握することも必要であろう。本課題の結果は施設の供給水のCO₂分圧計測ではあったものの、今後の研究を進めるための貴重なデータを得た。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

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生ずる、とまとめた。このような今後の世界の研究の方向性において、このプロジェクトで確立したCO₂制御技術は極めて重要なものであり、今後世界の研究コミュニティに広がると考えられる。

また、研究の過程では、その他の研究プロジェクトによる実験とも合わせて、海水水槽に投げ込み式の平衡器を浸すことで海水のCO₂分圧が計測できる装置の開発も行った。それをを用いると飼育水槽のCO₂管理が非常に容易になることがわかり、装置の普及で世界の海洋酸性化影響把握のための飼育実験の精度を大いに高めることが期待される。

(2) 環境政策への貢献

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。開催においては、本研究プロジェクトグループが協力して当たり、成功裏に行うことができた。

6. 引用文献

なし

7. 国際共同研究等の状況

研究代表者は、海洋酸性化を含む海洋CO₂関連国際研究協力のコアになっているIOCCP (International Ocean Carbon Coordination Project, supported by UNESCO/IOC)のおよびIGBPコアプロジェクトSOLAS (Surface Ocean and Lower Atmosphere Studies)の科学委員会委員を務め、世界の研究分野の協力をリードしている。また、もうひとつのIGBPコアプロジェクトで海洋生態系を扱うIMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research)は、共同で海洋酸性化研究に関する委員会(SIOA, SOLAS-IMBER Ocean Acidification Working Group)を構成し、研究代表者はその推進委員を務めている。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

- 1) 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 2010, 19:21-40
- 2) R. Kimura, H. Takami, T. Ono, T. Onitsuka, and Y. Nojiri: Effects of elevated pCO₂ on the early development of the commercially important gastropod, Ezo abalone *Haliotis discus hannai*. Fisheries Oceanography, 20, 357-366, 2011.
- 3) K. Fujita, M. Hikami, A. Suzuki, A. Kuroyanagi, K. Sakai, H. Kawahata, and Y. Nojiri, Effects of

ocean acidification on calcification of symbiont-bearing reef foraminifers, *Biogeosciences*, 8, 2089- 2098, 2011.

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) Y. Nojiri, Y. Shirayama, H. Kimoto, T. Egashira, and K. Kinoshita, An ocean acidification simulation experiment with benthic animals using a precise pCO₂ control system, Invited presentation in 2nd Int. Symp. on the Ocean in the High-CO₂ World, Monaco, 2008.
- 2) 野尻幸宏、環境省推進費による酸性化研究の概要、日本海洋学会シンポジウム 海洋酸性化による環境影響：現状と展望、東京海洋大学、2010.
- 3) Y. Nojiri, Y. Shirayama, H. Kimoto, T. Egashira, and K. Kinoshita, 2008; An oceanacidification simulation experiment with benthic animals using a precise pCO₂ control system, IPCC海洋酸性化ワークショップ、沖縄、2011.

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

- ・朝日新聞 (平成21年5月9日) CO₂放出増→海が酸性化→生態系に打撃 最近10年研究進む
- ・朝日新聞 (平成21年9月4日) 海の酸性化、生物に何が、最新装置で近未来を予測
- ・しんぶん赤旗 (平成21年9月6日) CO₂増が起こす海洋酸性化の危険
- ・静岡新聞、大分合同新聞、徳島新聞、中国新聞、岩手日報、紀伊民報など (平成21年10月5日から12月1日) CO₂が海を脅かす 酸性化で精子の運動大幅に低下
- ・朝日新聞 (平成22年2月1日) 京都大学など実験 酸性化 サンゴ育たぬ海 200年前より骨格1割軽く
- ・日経エコノミー (平成22年2月24日 NIKKEI NET) 海の酸性化、どこまで進行する？
- ・毎日新聞 (平成23年3月7日) IPCC第5次報告書展望

(6) その他

なし