

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

海洋酸性化が生態系サービスに及ぼす影響
-未来の海：CO₂シープを利用した解析-
(4RF-1701)

平成29年度～令和元年度

Effects of Ocean Acidification on Ecosystem Services: an Investigation Using a CO₂ Seep

〈研究代表機関〉
筑波大学

〈研究分担機関〉

〈研究協力機関〉

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 海洋酸性化が生態系サービスに及ぼす影響の評価 （筑波大学）	10
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	34

I. 成果の概要

課題名 4RF-1701 海洋酸性化が生態系サービスに及ぼす影響-未来の海：CO₂シープを利用した解析-

課題代表者名 和田 茂樹 (筑波大学生命環境系
下田臨海実験センター助教)

研究実施期間 平成29～令和元年度

研究経費（累計額） 18,455千円

(平成29年度：6,256千円、平成30年度5,943千円、令和元年度：6,256千円)

本研究のキーワード 生態系サービス、海洋酸性化、CO₂シープ、生物多様性、炭素隔離、食糧供給、レクリエーション

研究体制

単一機関であるため、サブテーマは無し。

- ・自然科学的手法に基づく生態系サービスの評価（筑波大学生命環境系）
- ・社会科学的手法に基づく生態系サービスの評価（筑波大学芸術系）

1. はじめに（研究背景等）

海に囲まれた我が国は海洋生態系から莫大な利益を得ており、国民の生活においても海洋生態系は重要な役割を担っている。しかし近年、人間活動によって放出されたCO₂の一部が海に溶けこむことで海洋酸性化を引き起こしており (Doney et al., 2009)、生態系に対する酸性化の影響の予測が危急的に求められている。海洋酸性化は海洋生態系の激変を引き起こし、ひいては人間活動に甚大な影響を与えると考えられているものの (Cooley et al., 2009)、その影響の客観的な評価は為されていない。生態系サービスは、人類が生態系から得る利益を客観的基準で評価するものであり、その評価によって酸性化の人間活動への影響を定量化することが期待される。しかし、海洋酸性化の生物への影響評価は、実験室下における飼育試験が主となっており、生態系レベルでの変化の予測は容易ではない。近年、生態系レベルでの酸性化の影響予測を行うことの可能な研究サイトとして、CO₂シープが注目されている (Hall-Spencer et al., 2008)。CO₂シープは、主に火山性のCO₂ガスが海底から噴出している海域であり、高濃度のCO₂が海水に溶け込み酸性化の進行した将来の生態系を疑似的に観察することが可能となる。研究代表者のチームは2014–2015年の調査で既に、伊豆諸島式根島にCO₂シープが存在することを報告している (Agostini et al., 2015)。式根島は有人の島であり、島民の生活範囲内にCO₂シープが存在する。そのため、海洋生態系を直接対象とする自然科学的な研究だけでなく、酸性化エリアに対する島民の認知調査を基にした社会科学的な研究を展開することのできる稀有な研究サイトである。

2. 研究開発目的

本研究は、式根島CO₂シープにおいて自然科学的および社会科学研究アプローチから、生態系サービスに対する酸性化の影響を評価することを目的とする。評価を行う生態系サービスの項目は、ミレニアム生態系評価の報告書に基づき、主要な4機能(基盤・供給・調整・文化的サービス)に対して、以下のように特に式根島で検証可能な内容を取り上げて解析する。

・基盤サービス…生息場の提供、栄養塩循環

酸性化の進行は、サンゴや海藻といった海底の大型付着性生物の生物相の激変を引き起こす。これらの生物は海底の形状に複雑性をもたらし、他の生物の生息場を提供するという機能を有するため、酸性化に伴って生息場を失う生物が現れる可能性がある。また、海底の一次生産者は栄養塩を取り込む役割を有しており、富栄養化の抑制に貢献する。

・調整サービス…炭素隔離

海底の一次生産者は、光合成でCO₂を吸収し有機態の炭素に変換する。生成した有機炭素の一部は、分解されにくい難分解性有機物に変化し、CO₂に戻ることなく海中に長期間貯留される。

・供給サービス…食料供給

酸性化に対して脆弱であるとされる貝類は (Harvey et al., 2018)、重要な漁業対象種の一つである。また、魚類は酸性化環境下で行動に変化が現れる可能性が指摘されている (Munday et al., 2014)。これらの生物に対する影響は、漁業生産活動に変化が現れる可能性を示唆している。

・文化的サービス…レクリエーション

酸性化に対して、サンゴは最も脆弱な生物群として知られている (Kroeker et al., 2013)。また、サンゴの減少は小魚や仔魚の住処を減少させることにつながる。レクリエーション活動としてのダイビングは、これらの生物を対象とすることが多く、その変化が予見される。

3. 研究開発の方法

研究実施体制：サブテーマ無し (1グループのみ)

1. 基盤サービス

1.1. 生息場の提供

海藻やサンゴといった生物種は、生物体それ自身が他の生物の住処として機能することが知られており、生態系における基盤種としての役割を担っている。そこで、基盤サービスを提供するこれらの生物種に対する海洋酸性化の影響を、式根島の様々なCO₂濃度の海域において調査を行い評価する。さらに、個々の生物への影響に留まらず、生態系レベルでの生息場の大きさを指標化し、海洋酸性化の包括

的な評価を可能にする。このほか、基盤種を利用する生物種をエアリフトサンプラーで網羅的に採取してその種組成を解析することで、生息場の低下が生物群集に及ぼす影響を実証的かつ定量的に明らかにする。

日本周辺の海域はCO₂濃度が低く、20世紀前半のCO₂濃度レベルであることから(Midorikawa, 2005)、過去から現在、未来にかけてのCO₂濃度変化に対する応答が予測評価と考えられる。CO₂および炭酸カルシウム飽和度の変化については、伊豆半島周辺の炭酸系マッピングの結果を利用する。

1.2. 栄養塩循環

過剰な栄養塩の流入は富栄養化を引き起こし、沿岸域の生態系に破滅的な影響をもたらす。しかし、海洋の一次生産者は栄養塩を取り込むことで、富栄養化の回避に貢献する。本研究では、閉鎖チャンバーを利用して栄養塩の取り込み量を測定し、基盤サービスの一つの項目である栄養塩循環機能に対して海洋酸性化が及ぼす影響を評価する。

2. 調整サービス

2.1. 光合成の測定

2.1.1. 付着初期過程の群集の光合成の測定

光合成に対する海洋酸性化の影響を生態系レベルで評価するためには、群集レベルでの解析が不可欠である。本プロジェクトでは、海中に付着基板を設置して数か月係留し、藻類の付着を経時的に観察する。さらにこの付着基板を回収後、明・暗条件で培養して酸素の変化量から純光合成速度および呼吸速度の見積もりを行う。

2.1.2. 自然群集の光合成の測定

2.1.1の実験は、あくまで初期遷移過程の群集の光合成であり、最終的には自然群集での光合成の応答を知ることが最優先であると言える。そこで、1.2.と同様の閉鎖チャンバーを利用して海底の一角を半閉鎖状態にし、チャンバー内の溶存酸素濃度の測定を実施する。これによって、海洋酸性化が光合成生産量の及ぼす影響を自然群集レベルで評価する。

2.2. 海藻の分解性の評価

光合成で固定した有機物の炭素隔離への寄与は、有機物の分解性も大きくかかわっている。生成された有機物の一部は、海中でバクテリアによって分解されてCO₂に戻るが、難分解性の有機物は長期間海中に滞留し、炭素隔離に貢献する。一般的に、バクテリアは有機物分子の中の化学的な結合の弱い部位を選択的に分解し、強固な結合部位を有する有機化合物は残存する。強固な結合部位は物理的に安定性が高く、化学結合を破壊するために要する熱エネルギーが大きい。すなわち、熱に対する有機物の安定性を利用して、有機物のバクテリア分解性を推測することが可能とされており、これは近年の研究成果においても示唆されている(Trevathan-Tackett et al., 2015)。分解実験は、個々の種に対して長期の実験設置が必要であり、多様な種の生息する自然生態系を群集レベルで解析する上では適さない。そこで本研究では、藻体の熱分解性を利用してバクテリア分解を推定するため、熱重量分析を実施する。

3. 供給サービス

3.1. 漁業者に対する認知調査

式根島CO₂シープは、御釜湾という島の一角に限定されている。そこで、式根島の漁業従事者を対象としたインタビューを行い、漁法・漁場・対象魚介類および御釜湾での操業状況を調査する。御釜湾は水深の比較的浅い海域であり、漁法・漁場・対象魚介類の情報から、沖合を対象とする漁業活動を排除し、御釜湾とその他の海域の認知の度合いを解析する。

3.2. 魚類相調査と市場有用種の比較

CO₂シープ周辺と影響のないコントロール海域において、魚類相の調査を実施する。それらの魚類相の中で市場価値の有る種に関しては水揚げ記録を基に定量化し、漁業資源量に対する海洋酸性化の影響を評価する。当初計画では、環境DNAを用いた魚類相調査を予定していたが、より正確度の高い結果を得るため魚類相を直接測定することとした。

3.3. 貝類への海洋酸性化の影響

大型の貝類は、漁業において重要な生物群である。そこで本海域で最大級の貝類であるボウシュウボラを対象にして、酸性化の影響調査を実施した。本種の殻の厚さおよび密度を、CTスキャンを利用して解析した。

4. 文化的サービス

4.1. 観光業従事者の認知調査

式根島のダイビング事業者の主導するダイビングツアーにおいて、参加者の水中写真の景観構成要素の解析を実施する。写真には、インストラクターがツアー中に示した水中の景観要素が含まれることとなり、その要素数がレクリエーションとしての価値の大きさを反映する。これを、CO₂シープのある御釜湾とそれ以外のコントロールエリアで比較し、海洋酸性化が観光業従事者の認知に及ぼす影響を明らかにする。

4.2. レクリエーションの価値を持つ魚群解析

3.2.において調査した魚類相の結果を基に解析を行う。レクリエーションの価値の重みづけには、PADI Japanのホームページ(<https://www.padi.co.jp/pb/>)上における魚類写真の投稿数を利用し、レクリエーションの価値を有する魚群のスコア化を行う。

4.3. サンゴへの海洋酸性化の影響

サンゴはダイビング産業の対象生物の中でも中核的存在であり、最も重要な有用種と言える。本研究では、式根島のコントロールエリアで採取したサンゴを、下田、式根島のコントロールエリア、酸性化エリアにそれぞれ移植し、定期的に水中重量の測定を実施して成長を計測する。

4.4. レクリエーション機能に関する支払い意思額の定量

サンゴおよびそこに生息する生物が形成する海洋景観は、ダイビングやシュノーケルといった海洋でのレクリエーション活動の対象として重要な要素である。ダイビングのWEBマガジンの読者を対象としたアンケート調査を実施し、レクリエーション機能に関する支払い意思額の定量化を行った。

4. 結果及び考察

研究実施体制：サブテーマ無し(1グループのみ)

1. 基盤サービス

1.1. 生息場の提供

CO₂シープの近傍では、サンゴや大型の海藻類の減少が認められた。これらの生物の体が作り出す三次元的構造は、小型の動物などの住処となり、生物多様性をはぐくむ場となる。さらに、エアリフトサンプラーを用いて1mm以上のマクロベントスを採取し群集構造を解析したところ、動物の種の多様性が海洋酸性化の進行とともに低下することが明らかとなった。

日本の周辺は世界的に見てもCO₂濃度が低く、炭酸カルシウム飽和度が高い(Midorikawa, 2005)。これは、伊豆半島周辺の炭酸系のマッピングデータとも一致する。すなわち、20世紀前半のCO₂レベルから現在、未来にかけての予測評価が可能であり、400-500 ppm程度のCO₂レベルの海域で既に大きな変化が認められていることから、海洋酸性化に伴う劇的な生態系の変化は間近に迫った危機であることが示された。

1.2. 栄養塩循環

栄養塩の取り込み量は、コントロールエリアと比較して酸性化エリアにおいて相対的に大きくなる傾向を示した。すなわち、海洋酸性化の進行は富栄養化の抑制に寄与することが示された。

2. 調整サービス

2.1. 光合成の測定

2.1.1. 付着初期過程の群集の光合成の測定

付着した藻類のバイオマスの指標となるクロロフィル a の量は、設置サイト間で大きな差異は見られない。しかし、顕微鏡観察や色素組成の解析結果に基づくと、付着した藻類の群集組成には違いが認められ、コントロールエリアでは大型藻類が優占的に付着する一方で、酸性化エリアでは珪藻類が優占することが示唆された。単位面積当たりの光合成は、酸性化エリアにおいてより大きくなり、群集レベルで光合成能の増大が認められる。バイオマスの変化が認められないにもかかわらず光合成が増大した理由としては、酸性化エリアで優占した珪藻類が強い付着組織を有さないため、断続的に脱離しバイオマスを失っていたことが要因と考えられる。すなわち海洋酸性化の進行は、光合成生産物の行方にも影響を及ぼすことが示唆された。

2.1.2. 自然群集の光合成の測定

閉鎖式チャンバーを利用した測定では、コントロールエリアと酸性化エリアにおいて、光合成速度の差はほとんど見られなかった。これは、自然群集に関しては光合成の基質となる CO_2 が増大してもその施肥効果は大きくないことを意味している。従来、海洋酸性化の正の側面として光合成の増大の可能性が指摘されていたが(Gao et al., 1991; Xu et al., 2017)、本研究の結果はこれらの考えを覆すものであり、海洋酸性化の将来予測の根本を変える大きな重要性を有する。

2.2. 海藻の分解性の評価

コントロールエリアおよび酸性化エリアで採取した藻類の熱分解性には、大きな差異は認められなかった。すなわち、有機物の分解性という点では海洋酸性化の影響は大きくないということが示唆された。

3. 供給サービス

3.1. 漁業者に対する認知調査

式根島の CO_2 シープは浅海域に位置しており、沿岸での漁業が対象となる。漁業従事者に対するインタビューで、対象となる魚介類はタカベ、イセエビ、サザエ、アワビ、トサカノリ、テングサなどが挙げられ、これらの生物種に対する酸性化の影響は漁業従事者にとってネガティブな認知であることが示された。また、 CO_2 シープの存在する御釜湾は、漁場として積極的に利用する海域ではないことも聞き取り調査から明らかとなった。

3.2. 魚類相調査と市場有用種の比較

魚群調査の結果から、 CO_2 シープ周辺では魚類の種多様性が低下することが明らかとなった。また、市場価値のある種を対象を絞り漁業資源量を定量化したところ、酸性化エリアは漁業資源が低下することが明らかとなった。

3.3. 貝類への海洋酸性化の影響

酸性化エリアにおいて発見されたボウシュウボラは、殻の表面が溶け出し白く変色している。またCTスキャンの結果から、殻の厚さおよび密度が低下することも明らかとなった。これらの結果は、貝の石灰化コストの増大や防御力の低下を意味しており、ネガティブな影響を及ぼすことが示唆された。

4. 文化的サービス

4.1. 観光業従事者の認知

ツアー参加者の水中写真の構成要素は、コントロールエリアではサンゴや魚類が多く含まれていたのに対し、酸性化エリアは泡やウミガメが多く出現した。サンゴや魚類は、ダイビングの主要対象生物であり、これらの要素に対して海洋酸性化はネガティブな影響を及ぼすと考得られる。

4.2. レクリエーションの価値を持つ魚群解析

PADI Japanのホームページ上には自由に魚類の写真を投稿できるサイトがあり、このサイト上の投稿数をレクリエーションの価値の重みづけに用い、スコア化した。その結果、レクリエーションの価値を有する魚類のスコアは酸性化エリアで大きく低下しており、海洋酸性化によってレクリエーションの価値が大きく損なわれることが示された。

4.3. サンゴへの海洋酸性化の影響

二種のサンゴを移植して実験を行ったところ、枝状サンゴであるエンタクミドリイシは水温上昇に伴う成長の増大と海洋酸性化による減退が観察された。一方で、被覆状サンゴであるフタマタハマサンゴは、温暖化および海洋酸性化の影響はほとんど見られない。すなわち、温暖化および海洋酸性化に対する感受性はサンゴの種間でも大きく異なることが示された。

4.4. レクリエーション機能に関する支払い意思額の定量

webアンケート調査によるコントロールと酸性化したサイトの写真群選択実験から、酸性化した海洋景観はダイバーにとって望ましくない海洋景観であることが示された。さらに、海洋景観を保全するための支払意思額から算出したレクリエーション機能の価値は年間202億円程度となった。

5. 生態系サービスのレーダーチャート化

式根島での事例解析は、海洋酸性化の実証事例として高い独創性を有する一方で、金額換算したサービスの絶対値の代表性という点において信頼性は高くない。そこで、各サービスの項目に関して、コントロールエリアに対する酸性化エリアの比を表し、相対的な変化を示すことが最も有用性が高いと判断した。特に、生態系サービス全体を俯瞰する上で有効な、レーダーチャートに描画し影響を評価したところ、一部のサービスでは増大傾向も認められたが概ね生態系サービスは低下する傾向があることが明らかとなった。

6. 中間評価に対する対応

6.1. CO₂シープにおけるCO₂濃度以外の影響の評価

本プロジェクトがスタートするより前に、既に水温や塩分、CO₂以外のガス成分の影響については検討済みであり、噴出するガスはほぼCO₂であることを既に示している(Agostini et al., 2015)。さらに、本プロジェクトでは栄養塩濃度の海域間比較も実施し、その違いはほとんどないことを示すことで、生態系の変化の要因が主にCO₂であることをより信頼性の高いものとした。

6.2. 経済的評価の表現法

当初予定していた金額への換算は、単純な換算を行うと精度の低い数値を提示する危険性を持つ。そこで、金額への換算は比較的信頼性の高い、レクリエーション機能に対する支払い意思額の定量のみとし、包括的な評価に関してはコントロールエリアと酸性化エリア(今世紀末の予測値に相当)の比をレーダーチャート化することとした。これによって、項目ごとの変化の大きさを俯瞰的に表現することが可能となった。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究は日本近海の温帯域で初めて発見されたCO₂シープにおいて、(a)生物多様性の実態を把握するとともに、(b)生息場の提供、(c)炭素隔離、(d)漁業生産物の提供、(e)ダイビング産業への貢献への影響を明らかにし、(f)生態系サービスの変化を包括的に予測することを目的とする。(a)に関しては、石灰化生物や大型の藻類の減少、マット状の藻類の増加を示すことに成功し、温帯域においても劇的な生態系の変化が生じることを明らかにした。(b)に関しては、付着性のベントスの変化が小型動物の生息場を減少させるという結果を明らかにし、酸性化に対する海洋生態系の直接的な応答だけでなく間接的な応答も示すという点は新規性も高く、科学的意義が大きい。(c)に対しては、酸性化が光合成を増大するという一般的知見に対して、影響は限定的であることを明らかにした。光合成は生態系の基盤を為す重要なプロセスであるにもかかわらず、自然の生態系を用いて酸性化に対する応答を検証した例は無く、本研究の結果は大きな意義を持つ。個々の生物への影響について、実験室における検証例は数多く報告されているが(McClintock et al., 2009; Lischka et al., 2011)、現場環境での報告例は数少ない。(d)に関しては環境DNAによる魚類相調査および貝類への影響評価を予定していたが、魚類相調査については直接の魚群カウントに切り替え、酸性化に伴う魚種の減少を明らかにした。また、貝類は殻形成への阻害が明らかとなった。魚類相の結果を基に漁業資源量を見積もったところ、有用魚種数の減少も認められ、これは式根島の漁業従事者が酸性化エリアを漁場として忌避する傾向と整合的である。(e)に関しては、ダイビングの対象となる魚類やサンゴに対する酸性化の負の影響を示し、ダイビング事業者の行動にも負の影響が生じることが明らかとなった。特に、(d)および(e)で評価した、漁業やダイビング事業者への調査といった社会科学的アプローチは、酸性化研究において世界でも初の事例であり、高い新規性・科学的意義を有する。これらの結果を基に、(f)に関する生態系サービスの評価を実施した。この際、サービスの変化の相対値をレーダーチャートに示すことで、海洋酸性化の影響を包括的に示すことに成功した。以上のように、(a)-(f)に関する当初目標はプロジェクト期間中に達成された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項は無い。

<行政が活用することが見込まれる成果>

国際的な報告書や目標への貢献：IPBESの地球規模の評価報告書第2稿において、海洋酸性化の生態系への影響についての情報提供に貢献できる。2018年6月29日までの間に実施された外部レビューにおいて専門家としてレビューを行い、情報をインプットした。また、IPCCの第5次報告書においても海洋酸性化の記述は極めて少なく、特定の生物群へのネガティブな影響が述べられているに過ぎない。本プロジェクトの成果は、人間活動に対する酸性化の影響を実証的に示す初の知見であり、成果は順調に学術論文として公表されていることから、環境政策への貢献(国際貢献)の一つである、IPCCの次期報告書作成に資するものと考えられる。また、生物多様性条約の愛知目標10において、2015年までに海洋酸性化から影響を受ける脆弱な生態系への人為的圧力の最小化、健全性と機能の維持がうたわれている。本プロジェクトは、日本近海温帯域の典型的藻場も生態系の激変が生じる脆弱な生態系であることを示しているだけでなく、生態系サービスという尺度で生態系の機能評価をするという点で貢献度が高い。国内における取り組みへの貢献：2017年7月に環境省より出された、「生物多様性分野における気候変動への適応について当面の具体的取組」に貢献が期待される。この中では、気候変動による生物多様性および生態系サービスへの影響の把握が盛り込まれており、酸性化に伴う生態系の生物多様性の変化や生態系サービスの変化をとらえる本プロジェクトは目的が完全に合致している。その他、生態系を活用

した適応策の推進もうたわれており、式根島島民の酸性化エリアの利用形態は、将来起こりうる適応の形であると言えることから、適応策の具体的な策定における根拠としても重要度が高い。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) S. Wada, M. Ishii, N. Kosugi, D. Sasano, W. Matsushita, Y. Omori, T. Hama: J. Oceanogr. (in press)
Seasonal dynamics of seawater CO₂ system at a coastal site near the southern tip of Izu Peninsula, Japan.
- 2) B. P. Harvey, S. Agostini, K. Kon, S. Wada, J. M. Hall-Spencer: Diversity, 11, 12, 242 (2019)
Diatoms dominate and alter marine food-web when CO₂ rises.
- 3) J. M. Hall-Spencer, B. P. Harvey: Emerging Topics in Life Sciences, 3, 197-206 (2019)
Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation.
- 4) 氏家萌美、武正憲、原光宏、和田茂樹：環境情報科学学術研究論文発表会、32, 227-232 (2018).
式根島浅海域CO₂シープに対するダイビング事業者と漁業従事者の認識
- 5) 和田茂樹、アゴスティーニシルバン：地球化学、51, 195-205 (2017)
沿岸の一次生産者に対する海洋酸性化の影響-CO₂シープにおける生態系の変化-

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表（学会等）

- 1) S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, K. Kon, M. Take: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Makuhari, Japan, 2020（登録受理済み）
Effects of ocean acidification on marine ecosystem services: use of natural analogues around volcanic CO₂ vents.
- 2) 和田茂樹：ワークショップ「海洋酸性化問題と二酸化炭素回収貯留(CCS)技術」(2018)
式根島CO₂シープで見られる未来の海
- 3) S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, Y. Omori, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018
Photosynthetic activity of early successional phytobenthos at a shallow CO₂ seep off Shikine Island, Japan.
- 4) S. Agostini, B. P. Harvey, S. Wada, K. Kon, M. Milazzo, K. Inaba, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018
Ocean acidification drives community shifts towards simplified non-calcified habitats in a subtropical-temperate transition zone.
- 5) S. Kurosawa, S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, M. Milazzo, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018
Effects of ocean acidification on net community production in coastal ecosystems: In situ assessment in natural CO₂ seeps.
- 6) B. P. Harvey, S. Agostini, S. Wada, K. Inaba, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018

Dissolution: the Achilles' heel of gastropods in an acidifying ocean.

- 7) 武正憲、原光宏、和田茂樹：第129回森林学会大会（2018）
富士箱根伊豆国立公園式根島における浅瀬（浅海域）CO₂シープの観光価値
- 8) S. Kurosawa, S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, M. Milazzo, J. M. Hall-Spencer：2018 Ocean Science Meeting, Portland, USA, 2018
Effects of ocean acidification on photosynthesis in coastal ecosystems: In situ assessment in natural CO₂ vents.
- 9) 和田茂樹：第33回国際生物学賞記念シンポジウム（2018）
Ocean acidification and energy flow in marine ecosystems.
- 10) S. Agostini：第33回国際生物学賞記念シンポジウム（2018）
Tropicalization of coastal marine ecosystems: From macroalgae to corals?
- 11) 和田茂樹、S. Agostini, B. P. Harvey, 今孝悦、J. M. Hall-Spencer、稲葉一男：2017年環境研究シンポジウム（2017）
CO₂シープを用いた海洋酸性化の進行に対する生態系の将来予測
- 12) 和田茂樹、Agostini Sylvain、Ben Harvey、大森裕子、濱健夫、Marco Milazzo、Jason Hall-Spencer：2017年度日本海洋学会秋季大会（2017）
附着性藻類の光合成に対する海洋酸性化の影響-CO₂シープを利用した解析-
- 13) S. Agostini: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
Future of marine ecosystems at the transition zone between subtropical and temperate: insights from a CO₂ seep on the Japanese Pacific Coast.
- 14) B. P. Harvey: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
The role of mat-forming algae in positively reinforcing an ecological shift: a CO₂ seep case study.
- 15) S. Wada: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
Natural variability of carbonate chemistry in southern coastal region of Japan.

7. 研究者略歴

研究代表者

和田 茂樹

筑波大学生命環境科学研究科生命共存科学専攻修了、博士（理学）、現在、筑波大学下田臨海実験センター助教

研究分担者

1) Agostini Sylvain

静岡大学創造科学技術大学院修了、博士（理学）、現在、筑波大学生命環境系助教

2) Ben Harvey

Aberystwyth University, Institute of Biological, Environmental and Rural Sciences
卒業、PhD、現在、筑波大学生命環境系助教

3) 今 孝悦

東京大学大学院農学生命科学研究科修了、博士（農学）、現在、筑波大学生命環境系助教

4) 武 正憲

東京大学大学院新領域創成科学研究科修了、博士（環境学）、現在、筑波大学芸術系准教授

II. 成果の詳細

研究実施体制：サブテーマ無し(1グループのみ)

筑波大学生命環境系

下田臨海実験センター

和田 茂樹

Agostini Sylvain

Ben Harvey

今 孝悦

筑波大学芸術系

武 正憲

平成29～令和元年度研究経費（累計額）：18,455千円（研究経費は間接経費を含む）
（平成29年度：6,256千円、平成30年度：5,943千円、令和元年度：6,256千円）

[要旨]

CO₂の増加は海洋酸性化を引き起こし、生態系の劇的な変化の要因として懸念されている。生態系の変化は人間生活に対しても甚大な影響を及ぼすとされているが、その影響評価例はほとんどない。本研究では式根島CO₂シープを利用して、海洋酸性化が生態系サービスに及ぼす影響を定量化する。CO₂シープの近隣に住民が居住している式根島は、人々が酸性化した海洋生態系を利用する様子を評価できる唯一の研究サイトであり、我々は生態系サービスの変化を自然科学的および社会科学的な手法から解析した。

生態系サービスは、基盤・調整・供給・文化的サービスの各項目に対して評価し、生物の生息場、栄養塩循環、炭素隔離、食料の供給、レクリエーション機能への影響を明らかにした。結果的に、多くのサービスにおいて海洋酸性化が負の影響を及ぼすことが示され、海洋酸性化の影響は最終的に人の生活に甚大な影響を及ぼすことが明らかとなった。

[キーワード]

生態系サービス、海洋酸性化、CO₂シープ、生物多様性

1. はじめに

海に囲まれた我が国は海洋生態系から莫大な利益を得ており、国民の生活においても海洋生態系は重要な役割を担っている。しかし近年、人間活動によって放出されたCO₂はその一部が海に溶けこみ、海洋酸性化を引き起こしており(Doney et al., 2009)、生態系に対する酸性化の影響の予測が危急的に求められている。海洋酸性化は海洋生態系の激変を引き起こし、ひいては人間活動に甚大な影響を与えると考えられているものの(Cooley et al., 2009)、その影響の客観的な評価は為されていない。生態系サービスは、人類が生態系から得る利益を客観的基準で評価するものであり、酸性化の人間活動への影響を定量化することが期待される。しかし、海洋酸性化の生物への影響評価は、実験室下における飼育試験が主となっており、生態系レベルでの変化の予測は容易ではない。近年、生態系レベルでの酸性化の影響予測を行うことの可能な研究サイトとして、CO₂シープが注目されている(Hall-Spencer et al., 2008)。CO₂シープは、主に火山性のCO₂ガスが海底から噴出している海域であり、高濃度のCO₂が海水に溶け込み酸性化の進行した将来の生態系を疑似的に観察することが可能となる。研究代表者のチームは2014–2015年の調査で既に、伊豆諸島式根島にCO₂シープが存在することを報告している(Agostini et al., 2015)。式根島は有人の島であり、島民の生活範囲内にCO₂シープが存在する。そのため、海洋生態系を直接対象とする自然科学的な研究だけでなく、酸性化エリアに対する島民の認知調

査を基にした社会科学的な研究を展開することのできる稀有な研究サイトである。

2. 研究開発目的

本研究は、式根島CO₂シープにおいて自然科学的および社会科学研究アプローチから、生態系サービスに対する酸性化の影響を評価することを目的とする。評価を行う生態系サービスの項目は、ミレニアム生態系評価の報告書に基づき、主要な4機能(基盤・供給・調整・文化的サービス)に対して、以下のように特に式根島で検証可能な内容を取り上げて解析する。

- ・基盤サービス…生息場の提供、栄養塩循環

酸性化の進行は、サンゴや海藻といった海底の大型付着性生物の生物相の激変を引き起こす。これらの生物は海底の形状に複雑性をもたらし、他の生物の生息場を提供するという機能を有するため、酸性化に伴って生息場を失う生物が現れる可能性がある。また、海底の一次生産者は栄養塩を取り込む役割を有しており、富栄養化の抑制に貢献する。

- ・調整サービス…炭素隔離

海底の一次生産者は、光合成でCO₂を吸収し有機態の炭素に変換する。生成した有機炭素の一部は、分解されにくい難分解性有機物に変化し、CO₂に戻ることなく海中に長期間貯留される。

- ・供給サービス…食料供給

酸性化に対して脆弱であるとされる貝類は、重要な漁業対象種の一つである。また、魚類は酸性化環境下で神経に異常をきたし、行動に変化が現れることが知られている(Munday et al., 2014)。これらの生物に対する影響は、漁業生産活動に変化が現れる可能性を示唆している。

- ・文化的サービス…レクリエーション

酸性化に対して、サンゴは最も脆弱な生物群として知られている。また、サンゴの減少は小魚や仔魚の住処を減少させることにつながる。レクリエーション活動としてのダイビングは、これらの生物を対象とすることが多く、その変化が予見される。

3. 研究開発方法

研究実施体制：サブテーマ無し(1グループのみ)

1. 基盤サービス

1.1. 生息場の提供

1.1.1. コドラート調査

付着性のベントスに関してコドラート調査を実施した。調査サイトは潮間帯と潮下帯に分け、CO₂分圧(pCO₂)が300 μatmから1800 ppmの範囲にコドラートをランダムに設置して、出現する生物の被度もしくは個体数を計数した。

1.1.2. 生物が作り出す海底の複雑性の定量化

コドラートで定量した各生物群を5段階にスコア化した。最小スコアは1であり、被覆性石灰藻や小型のフジツボなどが含まれる。2はマット状の藻類や小型の藻類、3は分岐型の石灰藻やカキ、4は大型の藻類や塊状のイガイ類と定義した。最大スコアは5であり、造礁サンゴとした。それぞれのスコアを被度に乘じた後、その総和を生物によって作り出された海底の複雑性と定義した。

1.1.3. 付着性ベントスを住処とするマクロベントスの調査

酸性化エリアとコントロールエリアのそれぞれで、一定面積のサークルを海底に設置し、エアリフトサンプラーを用いて海底を吸引した(図1)。採取した生物は1mmのメッシュで篩い、科レベルで動物を同定した。



図1 エアリフトサンプラー

1.1.4. 周辺海域における炭酸系化学の解析

伊豆半島沖において定点を設置し、溶存態無機炭素(DIC: Dissolved Inorganic Carbon)および全アルカリ度(TA: Total Alkalinity)のモニタリングを行った。同時にCTD(電気伝導度-水温-深度)センサーを利用した観測も行い、得られたDIC、TA、水温および塩分のデータを利用して、炭酸カルシウム飽和度の解析を行った。

1. 2. 栄養塩循環

酸性化エリアとコントロールエリアの両方の海底にランダムにサークルを設置し、底部が円形の可変性チャンバー(フレキシブルチャンバー)を設置した(図2)。チャンバーには採水口が取り付けられており、設置直後と10分後の海水を採取後にディスマックフィルターでろ過を行い、分析まで-20℃で凍結保存した。チャンバー内の体積は、既知の濃度のフルオレセインを実験終了時にチャンバー内に注入し、チャンバー内の海水で希釈させた後に回収した。回収した海水のフルオレセイン濃度は、蛍光光度計で測定した。また、終了後にサークル内の藻類を上部から撮影し被度解析を行うほか、藻類を手で採取して重量測定を行った。

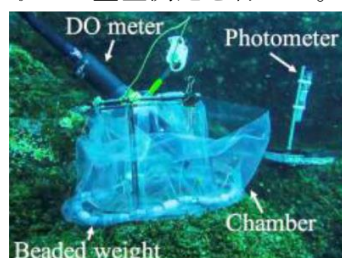


図2 フレキシブルチャンバー
左図はチャンバーの全体図を示す。右図はチャンバーを実施している様子を示す。

2. 調整サービス

2. 1. 光合成の測定

2. 1. 1. 付着過程の初期群集における光合成の測定

海中に付着基板を設置すると、藻類の付着を経時的に観察することができる。本研究では、透明のポリ塩化ビニル製のプレートがウレタン製ディスクに取り付け、ロープで海底から吊り上げて酸性化エリアとコントロールエリアの両方の海中に設置した(図3)。プレートは、設置後44日目と72日目に回収した。また、それぞれのサイトにおいて、海水の採取を行った。

プレートは200mlの透明ポリカーボネート瓶に入れ、酸性化エリアとコントロールエリアの海水をそれぞれ満たし、明条件および暗条件で1時間培養した。培養前後の溶存酸素濃度(DO: Dissolved Oxygen)を測定し、DO濃度の変化から純光合成速度、呼吸速度を見積もった。

プレート上から藻類をそぎ落とし、ジメチルホルムアミドに入れて光合成色素を抽出した。さらに、色素の組成を高速液体クロマトグラフで測定し、クロロフィルa他7種類の色素の量を定量した。



図3 プレート設置の様子
左図は設置前のプレートを示す。右図は72日間係留したプレートを示す。

2. 1. 2. 現場における光合成の測定

1. 2と同様にサークルをランダムに海底に置き、フレキシブルチャンバーを設置した。チャンバーには溶存酸素センサーが取り付けられており、10分間の設置の間の溶存酸素濃度の変化を経時的にモニターした。チャンバーの体積、藻類の被度および重量測定は1. 2と同様に行った。また、チャンバーの設置と同時に光量子測定も行い、試験中の光量子量の測定を実施した(図2)。

2.2. 海藻の分解性の評価

2.2.1. 熱重量分析

コントロールおよび酸性化エリアにおいてそれぞれ、4種および3種の海藻を採取し、160-800℃の範囲で藻体有機物の熱分解性を評価した。Trevathan-Tackett et al. (2015)によると、160-300℃の範囲の重量変化が最も微生物分解性を反映することが示唆されており、重量の減少率の比較を行った。

3. 供給サービス

3.1. 漁業者に対する認知調査

式根島に居住する漁業従事者10名に対してインタビューを行い、最初に彼らの漁法、漁場および対象魚介類を調査した。さらに、CO₂シープの位置する御釜湾内における漁に関して、漁業者の聞き取り調査を実施した。

3.2. 魚類相調査と市場有用種の比較

コントロールおよび酸性化エリアにおいて、50mラインを設置しライン沿いに魚種ごとに個体数をカウントした。さらに、ライン上のベントスの群落高度の計測と、CO₂センサーを利用したCO₂濃度の空間分布の解析を行った。データ化された魚種ごとの個体数を漁業資源量として評価するため、市場にあげられた魚種を三崎港に水揚げされた魚類342種と定義し(山田, 1990)、該当する種を市場価値のある漁業有用種として定義した。

3.3. 有用種(貝類)への海洋酸性化の影響

大型の貝類は、漁業において重要な生物群である。本研究では、本海域で最大級の貝類であるボウシユウボラを対象にして、酸性化の影響調査を実施した。本種を酸性化エリアおよびコントロールエリアで10個体ずつ採取し、CTスキャンを用いて殻の厚さおよび密度を解析した。

4. 文化的サービス

4.1. 観光業従事者の認知調査

式根島には、2件のダイビング事業者があり、両者に聞き取り調査を行った。うち1件はCO₂シープのある御釜湾を主要なツアー経路として利用しており、その回遊ツアーの参加者の水中写真を解析した。インストラクターの指示の元、ツアーの道中で水中写真が撮影されており、写真内の景観要素を岩、砂地、海藻、泡、魚類、ウミガメ、サンゴ、付着生物に分けて、撮影された要素数をそれぞれ計数した。

4.2. 有用種(サンゴ)への海洋酸化の影響

サンゴはダイビング産業における対象生物の中でも中核的なものであり、最も重要な有用種といえる。本研究では、式根島のコントロールエリアで採取したサンゴを、下田、式根島のコントロールエリア、酸性化エリアにそれぞれ移植し、定期的に水中重量の測定を行い成長の計測を実施した。下田と比較して式根島は、水温が約2℃高いことから、温暖化に伴う変化を捉えるための比較対象とした。さらに、式根島の酸性化エリアは、酸性化と温暖化の複合影響を受けると考えられる。

4.3. レクリエーションの価値を持つ魚群解析

3.2.において調査した魚類相の結果を基に解析を行った。PADI Japanのホームページ上にある、「みんなで作る魚図鑑」(<https://www.padi.co.jp/pb/index.asp>)に投稿された魚類をレクリエーションの価値を有する魚種と定義し、写真の投稿数が価値の大きさを反映するとした。そこで、個々の魚種の個体数に写真の投稿数を乗じて重みづけし、魚類相が有するレクリエーションの価値のスコアとした。

4.4. レクリエーション機能に関する支払い意思額の定量

ダイビングを中心に扱うWEBマガジンの読者へのwebアンケート調査によって実施した。図はwebアン

ケート調査で提示した写真群であり、サイトAはコントロールサイト、サイトBは酸性化サイトである。両サイトを構成する写真の要素はできるだけ同様の地形や生物の特徴を表現できるように選択し、撮影状況は同じような写真を用意することで、写真群の違いを明確にするように工夫した。サイトAとサイトBの違いは環境変化であることを説明したうえで、その環境変化の防止に対する支払意思額を選択させた。その支払意思額を元に、レクリエーション機能の価値を算出した。



図 アンケート調査で利用したサイト毎の写真群
(サイトA:コントロール, サイトB:酸性化)

4. 結果及び考察

1. 基盤サービス

1.1. 付着性ベントスの種組成の変化

潮間帯におけるコドラート調査では、大型のフジツボ、ウズマキゴカイ、二枚貝、石灰藻(式根島の石灰藻は、ヒライボ、イワノカワ、ガラガラなど主に紅藻からなる)などが、 pCO_2 の増加と共に被度もしくは個体数を減少させた。一方で石灰質を有さない海藻類は、 pCO_2 の増加と共に被度を増大させることが明らかとなった。潮下帯においては、大型の海藻、石灰藻、サンゴなどが減少し、小型の藻類や平面的に広がるマット状の藻類の被度の増大が観察された(図4～6)。

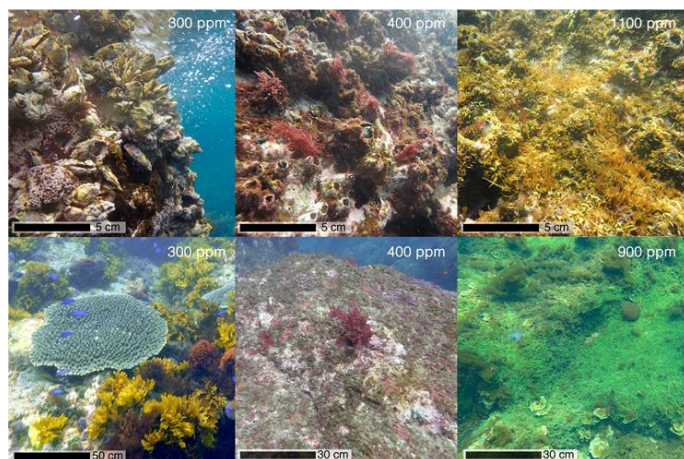


図4 ベントスの写真

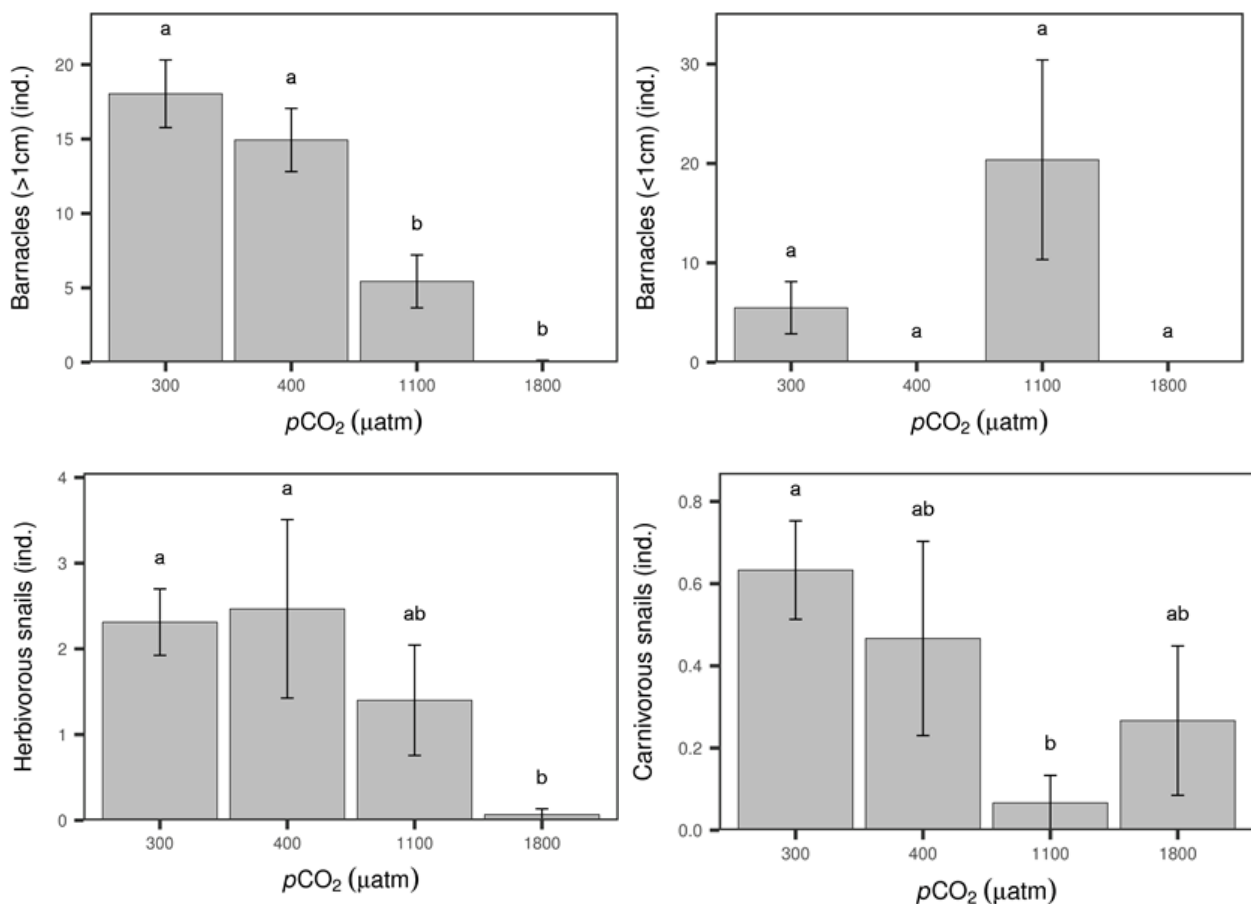
上の3枚の写真は潮間帯、下の3枚の写真は潮下帯を示す。左上と左下の写真は300 ppm、真ん中の2枚は400 ppm、右上は1100 ppm、右下は900 ppmの pCO_2 濃度のサイトを示す。

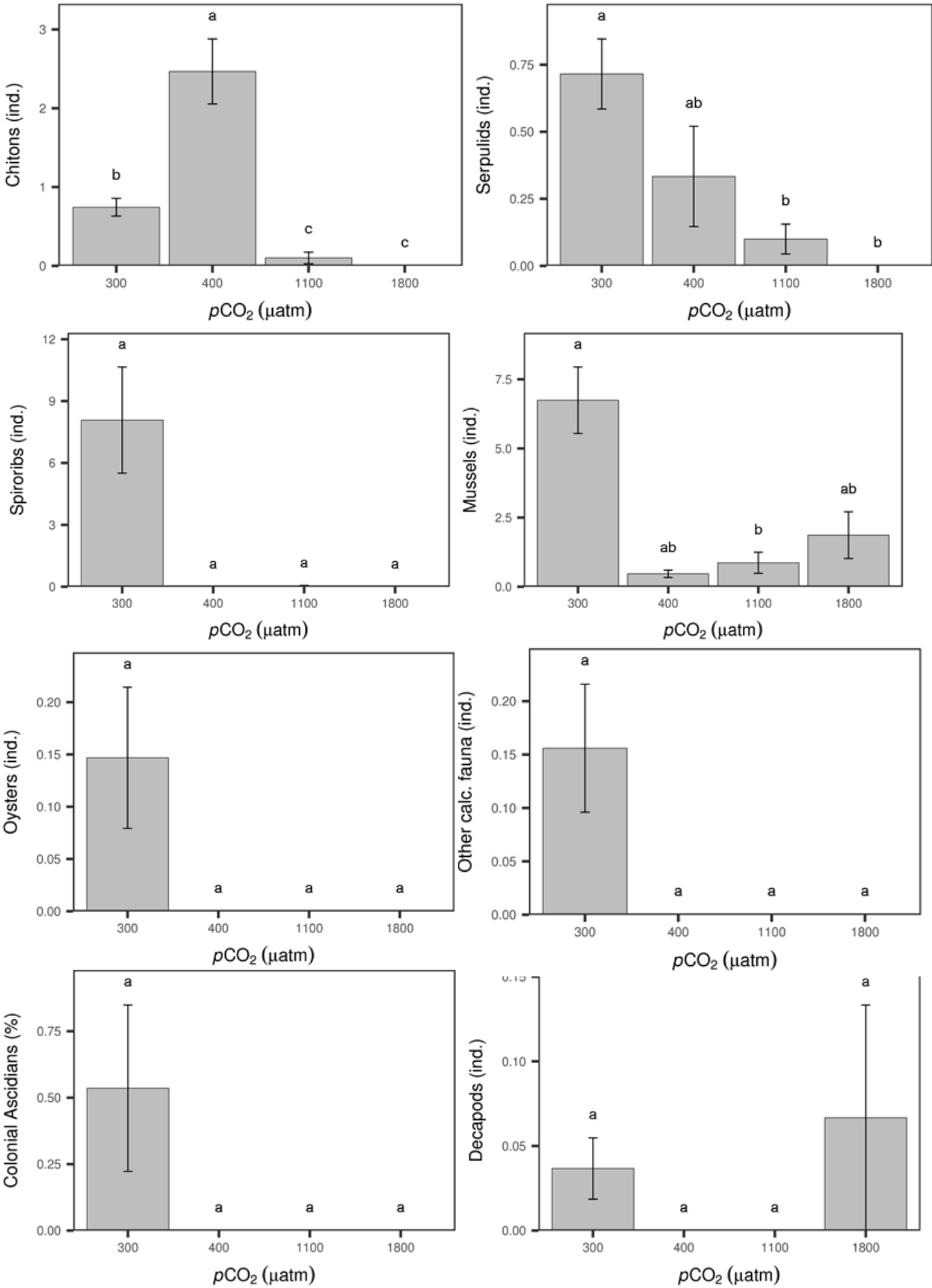
(Agostini et al. 2018)

pCO_2 の増加と共に被度もしくは個体数が減少した生物群は、その多くが石灰質の構造物を産生する生物群である。これは、酸性化に伴う炭酸カルシウムの飽和度の低下によって、これらの生物の石灰化が困難となったことを意味しており、実験室下における多くの観察結果(Kroeker et al., 2013)と整合的である。しかし、本研究サイトにおいて、石灰化生物以外にも生物量の明確な変化が観察されている。特に顕著なのは石灰藻以外の大型の海藻が減少し、数cm程度の海藻もしくは平面的に広がるマット状の藻類の被度が上昇する点である。すなわち、石灰質の構造物や大型の藻体が減少することで、ベントスの形成する海底の形状は平面的かつ単純になっていく。

海底の複雑性について、より明確な指標を基に比較するために、生物群ごとに複雑性への寄与のスコア化を行った。その結果、ベントスによって作られる海底の複雑性は、 $p\text{CO}_2$ の増加と共に低下していくことが明らかとなり、他の生物の住処となる海底の構造が酸性化によって失われることが明らかとなった(図7)。

そこで、実際に海底を住処とする動物の種組成の解析を実施した。1mm以上のマクロベントスは、コントロールエリアにおいて、ヨコエビやワレカラ、タナイスなど様々な種の甲殻類が同定されたが、酸性化エリアにおいては、タナイス類がそのほとんどを占めており、動物の種組成の著しい変化が明らかとなった(図8)。甲殻類は一部の種は酸性化で影響を受けるものの、全体的には比較的影響を受けにくいグループであることが、メタアナリシス研究から指摘されている(Kroeker et al., 2013)。それにもかかわらず変化が生じた要因としては、タナイスは堆積物中などに埋在して生活しているものが多く、マット状に広がる藻類の内部を住処にしていた一方で、ヨコエビなどは海藻の葉上に付着して生活していることから、付着性のベントスの小型化に伴う三次元的な構造の消失という間接的な作用によって生息場を失ったと考えられる。





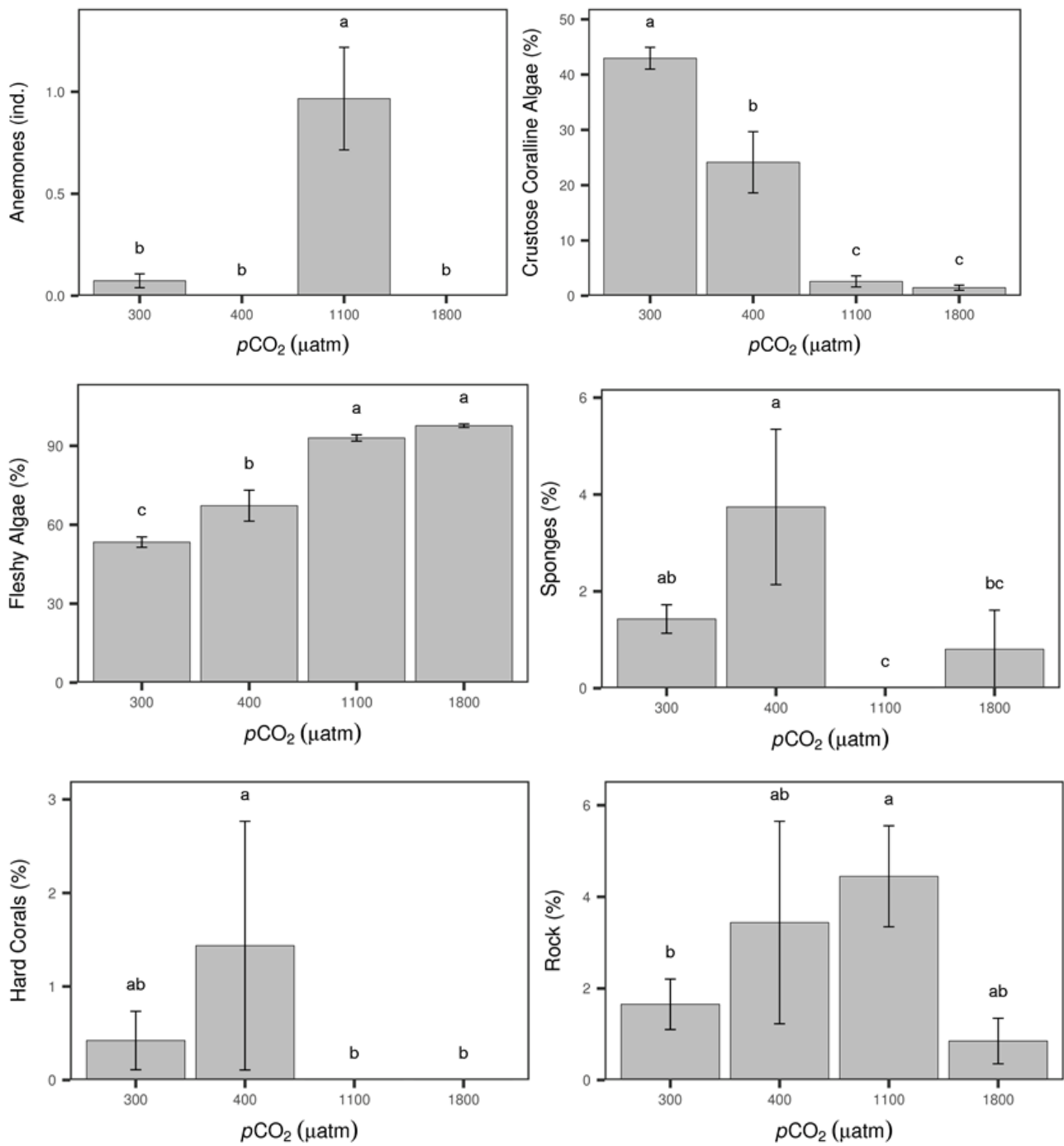
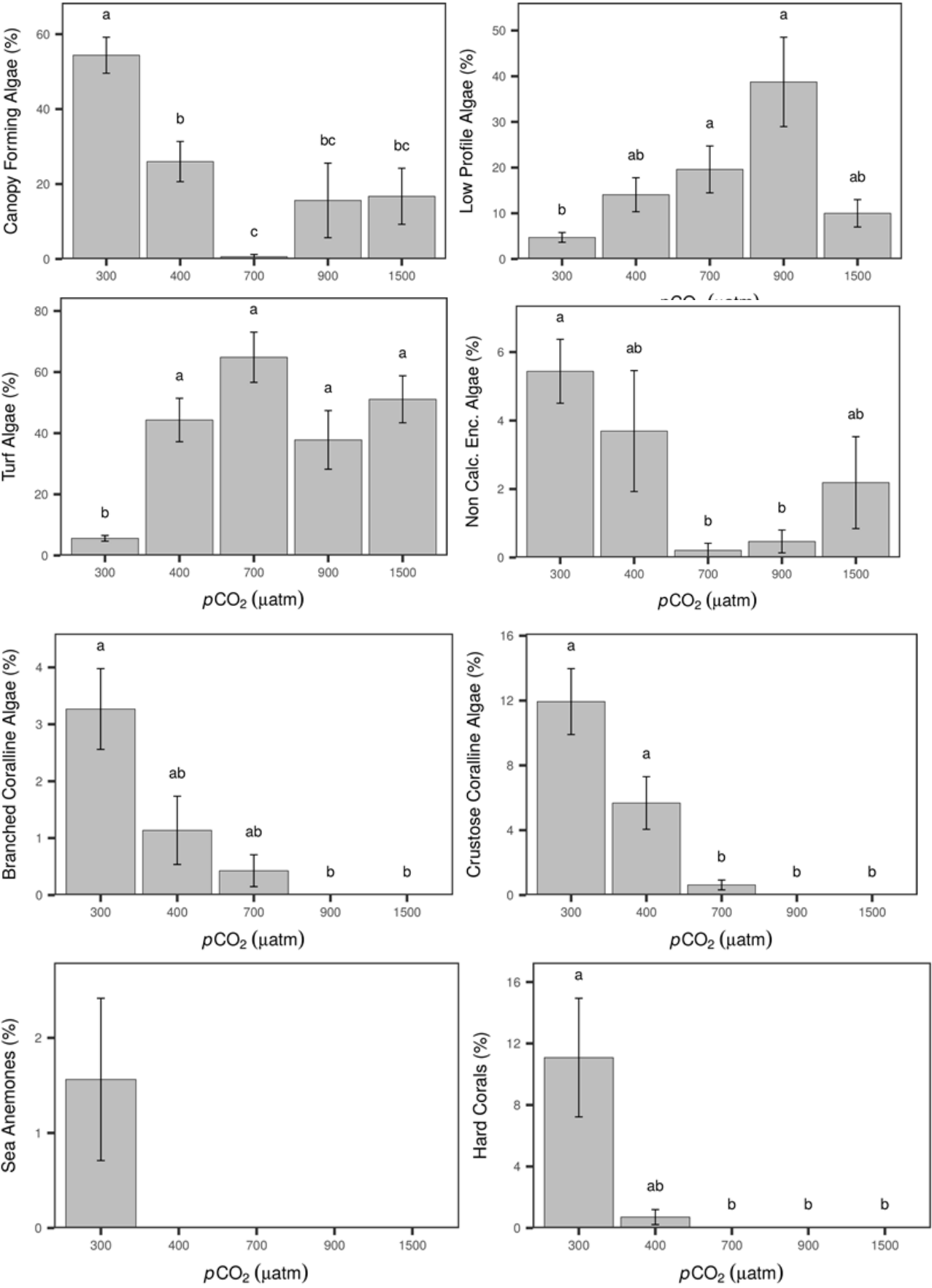


図5 潮間帯の各生物群の個体数もしくは被度
横軸はpCO₂濃度、縦軸は個体数もしくは被度を示す。



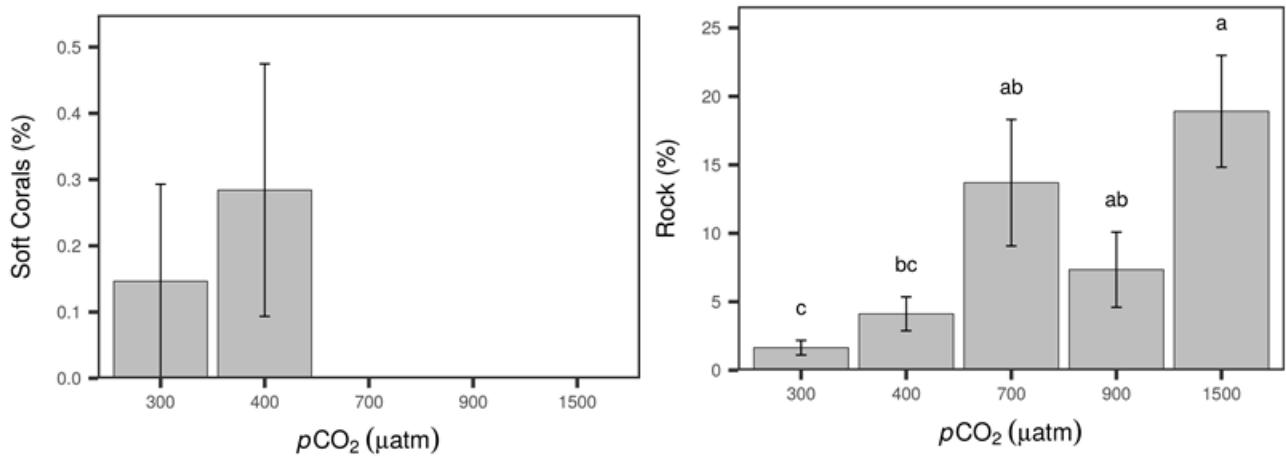


図6 潮下帯の各生物群の被度
横軸はpCO₂濃度、縦軸は被度を示す。

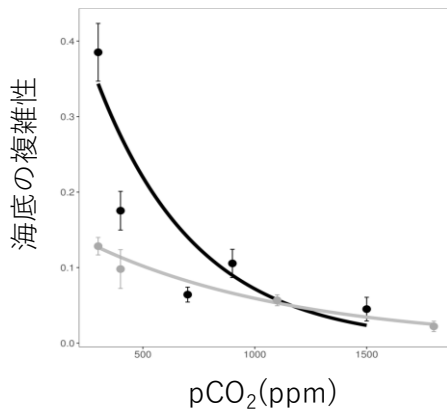


図7 海底の複雑性
横軸はpCO₂ (ppm)、縦軸は複雑性(スコア×被度)を示す。

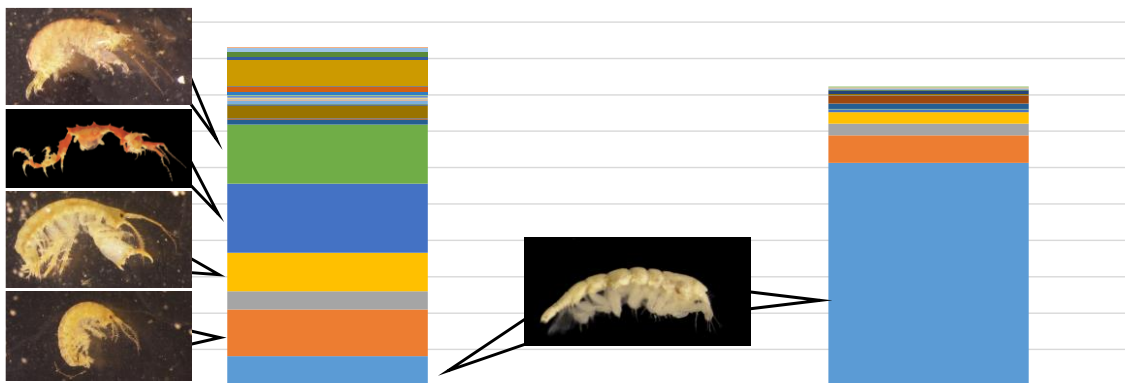


図8 海底のマクロベントスの種組成
左の棒グラフがコントロールエリア、右がCO₂シープを示す。

本研究で対象とする式根島は、北太平洋西部に位置している。この海域は世界的にみてもCO₂濃度の低い海域であり、CO₂シンクとして機能する(Midorikawa, 2005)。近傍の海域において実施した定期的な炭酸系のモニタリング結果を元にCO₂濃度を算出したところ、季節的な変化はあるものの上記の調査を実施した季節(初夏)は概ね300 ppm程度であり、20世紀初頭のpCO₂濃度に類似することが示唆された。

図7で示した海底の複雑性の変化は、300 ppmから400 ppmの間で既に変化が始まっている。この事実は、世界の海洋の平均的なCO₂のレベルで既に海洋酸性化の影響は顕在化し始めており、早急なCO₂削減の対策が求められていることを意味する。このように、式根島は世界レベルで海洋酸性化の変化を解析していくうえで、過去・現在・未来の変化を知ることのできる極めて貴重な研究サイトであることが明らかとなった。

1.2. 栄養塩循環機能

6月と2月の2回にわたり各サイトにおいて3-9回のチャンバー設置を行い、溶存態無機窒素の取り込み量を測定した。コントロールエリアは、6月および2月において、 1.16 ± 0.52 (平均±標準誤差、n=5) および 1.29 ± 0.71 (n=3) $\mu\text{molN min}^{-1} \text{m}^{-2}$ であった。酸性化エリアはやや取り込み量が高い傾向を示し、 1.43 ± 0.51 (n=9) および 3.05 ± 0.47 (n=7) $\mu\text{molN min}^{-1} \text{m}^{-2}$ となった。

2. 調整サービス

2.1. 光合成

2.1.1. 付着過程の初期群集

プレート上の単位面積あたりのクロロフィルaの量は、設置サイト間で大きな違いは見られないが、色素組成を比較すると、酸性化サイトではフコキサンチン、コントロールサイトではクロロフィルbの割合が大きくなる(図9)。クロロフィルaは藻類のバイオマスの指標であり、その違いがみられないことから酸性化は藻類の初期付着過程においてバイオマスには大きな影響を及ぼさないことが示唆された。その一方で、色素組成の変化は藻類の種組成の違いを意味している。フコキサンチンは主に珪藻および褐藻が含まれる不等毛植物門の藻類の指標色素であり、クロロフィルbは緑藻の指標色素であることから(Dring, 1998; Kuczyńska et al., 2015)、酸性化に伴い緑藻類の割合が減少し褐藻もしくは珪藻の優占度が増大することを示唆している。

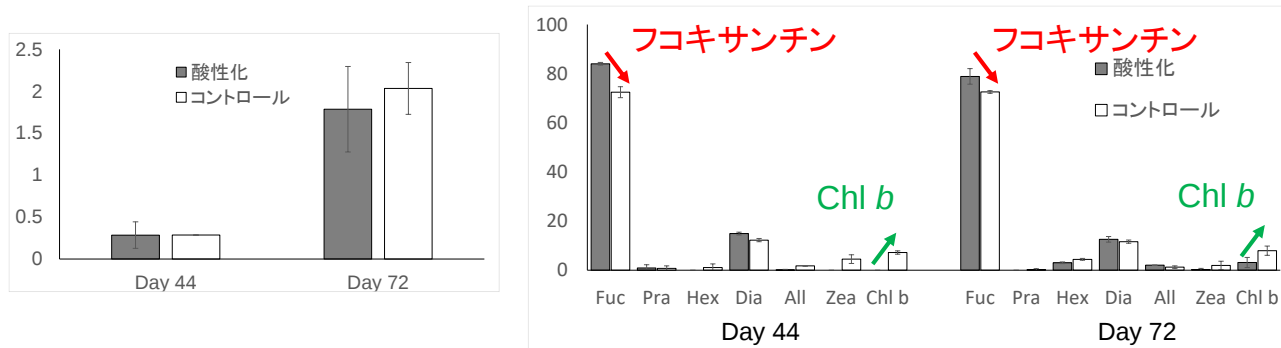


図9 色素の量および組成

左図は単位面積当たりのクロロフィルaの量を示す。縦軸はクロロフィルa量($\mu\text{g cm}^{-2}$)を示す。右図はクロロフィルaを除く7つの色素の和に対する各色素の割合を示す。Fuc: フコキサンチン、Pra: プラシノキサンチン、Hex: 19'-ヘキサノロキシフコキサンチン、Dia: ディアディノキサンチン、All: アロキサンチン、Zea: ゼアキサンチン、Chl b: クロロフィルb。

単位面積当たりの純光合成生産速度と呼吸速度を比較すると、酸性化条件下で純光合成生産速度がコントロール条件と比較して優位に高い。その一方で、呼吸速度には明確な違いは認められなかった(図10)。この結果は、酸性化に伴うCO₂濃度の増加が藻類に対するCO₂施肥効果を生み出し、光合成生産量を増大させたと考えられる。

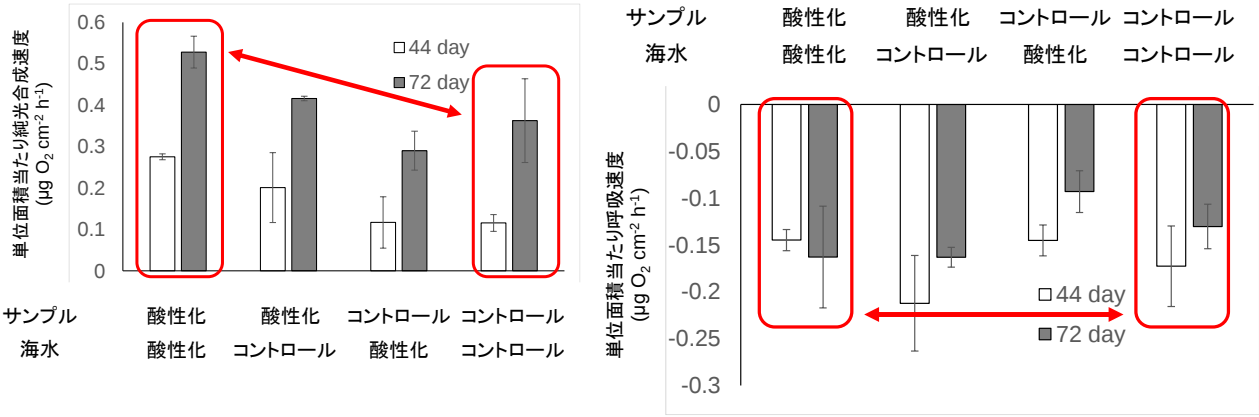


図10 単位面積当たりの純光合成速度と呼吸速度

左図は純光合成速度、右図は呼吸速度を示す。培養に使用したプレートサンプルの設置場所(サンプル)と、使用した海水の採取場所(海水)が示されており、組み合わせは4通り(サンプル: コントロール or 酸性化、海水: コントロール or 酸性化)ある。酸性化エリアでのサンプルを酸性化エリアの海水に入れたものが、未来の状況、コントロールエリアでのサンプルをコントロールエリアの海水に入れたものが現在の状況を模倣している(赤色の線で囲っている)。縦軸は単位面積当たり1時間当たりの酸素の増加もしくは減少量を示す($\mu\text{g O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。

2. 1. 2. 現場における光合成の測定

フレキシブルチャンバー内のDO濃度は10分の試験の間直線的に増加しており、本手法が光合成の測定手法として有効であることを示している(図11)。

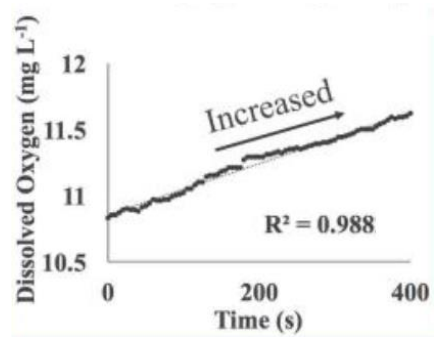


図11 チャンバー内のDO濃度の変化

横軸はチャンバーをかぶせてからの時間(秒)、縦軸はDO濃度(mg l^{-1})を示す。

DO濃度の増加速度から単位面積当たりの純光合成生産速度を算出し、同時に測定した光量子量と比較したところ、多くの場合で有意な正の相関関係が認められた(図12)。また、異なる季節のデータをまとめて解析しても、回帰直線の傾きは酸性化エリアとコントロールエリアでほぼ同レベルの値であった(図13)。

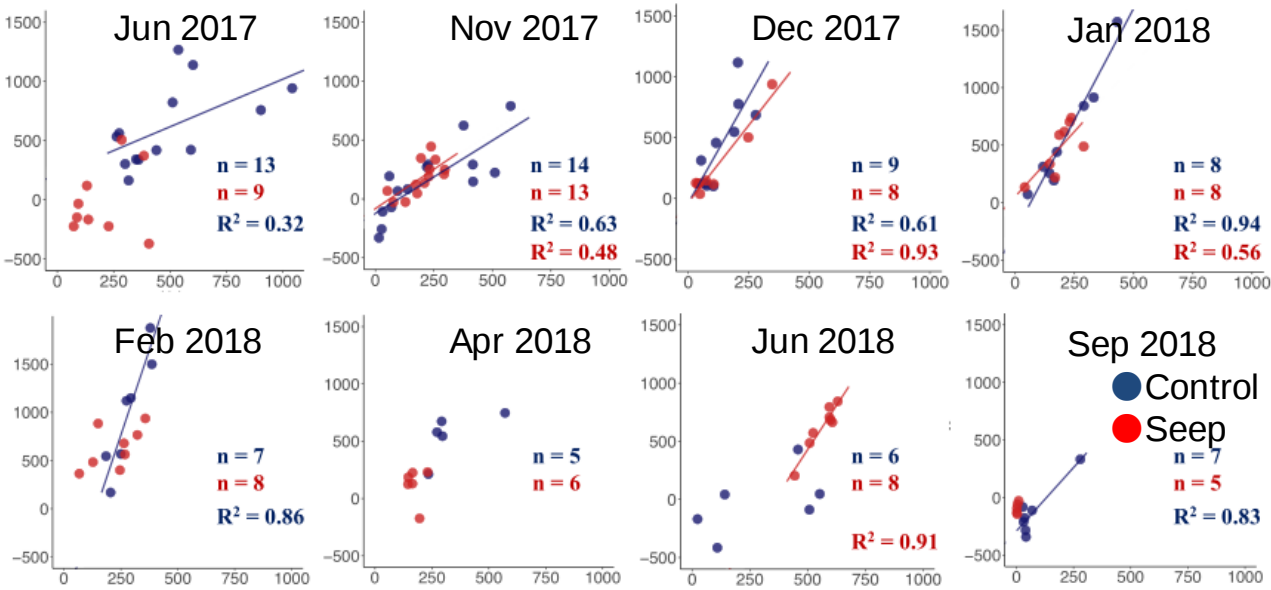


図12 単位面積当たり純光合成量と光量子量の関係
横軸は光量子量 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、縦軸は純光合成速度 ($\text{mg O}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) を示す。

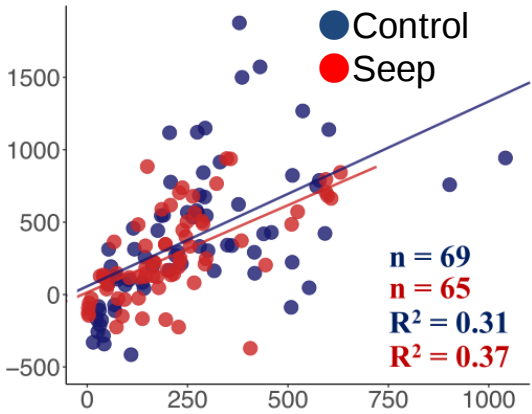


図13 全データを用いた、順光合成速度と光量子量の関係
横軸は光量子量 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、縦軸は純光合成速度 ($\text{mg O}_2 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) を示す。

先行研究において、実験室下で同一種を対象とした酸性化試験の報告は数多く存在する。その多くは酸性化条件下でCO₂の施肥効果が生じ、光合成は増大すると報告している (Kroeker et al., 2013)。しかし、酸性化は植物相に影響を及ぼし、藻類の優占種なども変化することから、同一種への試験では将来の海洋生態系の光合成への影響を評価することができない。本研究では、酸性化したエリアであるCO₂シープにおいて植物相の劇的な変化が観察されており、種組成の変化を考慮した上での光合成の変化を評価する例としては初の事例となる。

CO₂の施肥効果を考慮に入れると、光量子量と光合成速度の回帰直線の傾きは、酸性化サイトで大きくなると予測される。しかしながら、本研究では傾きはほぼ同じもしくは、酸性化サイトでやや小さいという傾向を示した。この事実は、生態系レベルで評価した際には、光合成はほとんど増大しないことを意味している。CO₂の施肥効果は、酸性化の影響予測において海洋生態系の機能が向上する可能性を有するプロセスとして、古くから提示されている (Gao et al., 1991)。しかし、本研究の結果を基にすると、CO₂の施肥効果は限定的もしくはほとんど影響を及ぼさないことが示された。

2. 2. 有機物の熱分解性

コントロールエリアおよび酸性化エリアにおいて、優占する海藻4種(コントロール：アツバノリ、マ

クサ、フクロノリ、スギノリ、酸性化：タカツキヅタ、ハイオウギ、シワヤハズ)を採取し、160℃から800℃まで10℃/minで昇温しながら重量の変化を測定した。Trevathan-Tackett et al. (2015)からは、160-300℃の範囲における減量の大きさが、植物体の生物分解性を反映すると指摘していることから、この温度範囲における重量の減少を比較したところ、コントロールエリアの4種と酸性化エリアの3種の平均減少量は、 $20.9 \pm 4.8\%$ および $16.5 \pm 1.6\%$ (平均±標準誤差)であった(図14)。わずかに酸性化エリアの海藻の方が分解されにくい傾向はあるものの、有意な差は認められなかった。

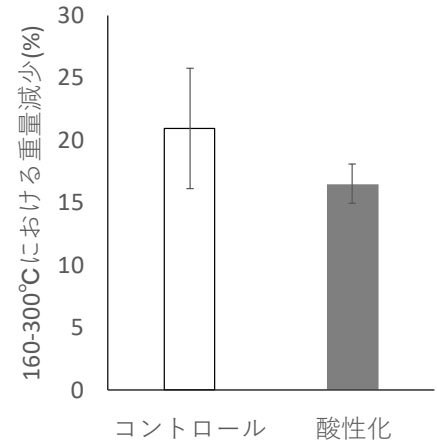


図14 160-300℃における重量の減少
縦軸は160-300℃の範囲での重量の減少率(%)を示す

3. 供給サービス

3.1. 漁業者の認知調査

式根島で行われている漁法には、沿岸で実施されるものと沖合で為されるものがあり、CO₂シーブが関連するのは沿岸での漁業となる。この際、主な対象となる魚介類は、タカベ、伊勢エビ、サザエ、アワビ、トサカノリ、テングサなどとなる。漁業従事者がCO₂シーブの存在する御釜湾に対して有する意識は、魚介類の少なさや変色といった、漁業生産物に対するネガティブな影響を有している一方で、36%が気になる点は無いと回答していることから、海底からの発泡を必要以上に畏れ敬うことは無く、漁業従事者のCO₂シーブの利用性については漁場としての価値が基本的な基準になっていると考えられる。また、漁場として頻繁に御釜湾を利用するかどうかについては全員の漁師が否定しており、少なくとも漁場として積極的に利用する価値は無いと考えられる(図15)。

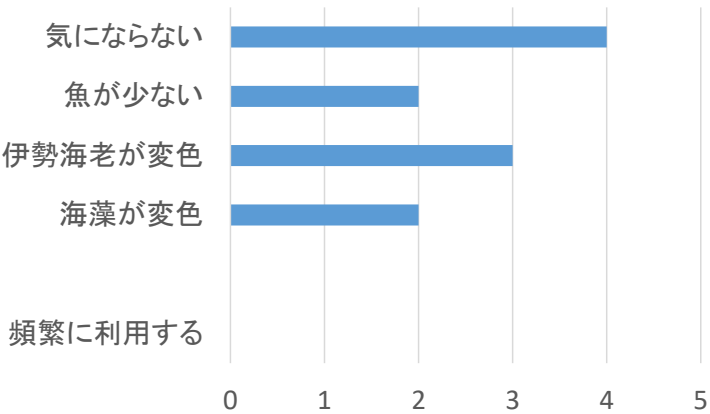


図15 漁業従事者に対するヒアリング結果
複数回答可。

3.2. 貝類への酸性化の影響

コントロールエリアで採取したボウシュウボラは、殻の表面に藻類などが着生しているのに対し、酸性化エリアでは殻の表面が溶解して真っ白く変色している。殻のCTスキャンを行うと、コントロール

で採取したボウシュウボラの殻は殻の厚みおよび密度がともに高いのに対して、酸性化エリアでは薄くかつ密度が小さくなる(図16)。特に殻の頂端部は完全に溶解していることがあり、肉質部が外界にさらされているケースも観察された。殻の表面への藻類の着生は、他の生物に発見されにくくなる擬態効果があると考えられるが、酸性化によって捕食リスクが増大する可能性が考えられる。また、殻の溶解によって防御力は低下すると考えられることから、貝類に対する影響は総じてネガティブなものと考えられる。

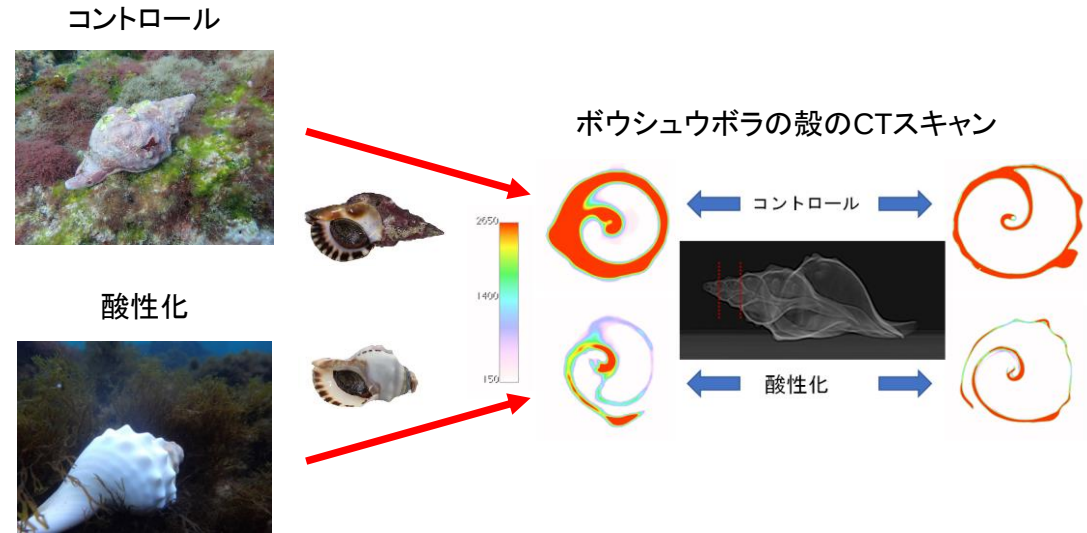


図16 ボウシュウボラの殻の変化とCTスキャンの結果

左図は生体の写真。コントロールエリアは藻類の着生がみられるが、酸性化エリアでは真っ白く変色している。右図はCTスキャンの結果。暖色は殻の密度が高く、寒色は密度が低いことを示す。

3.3. 市場価値のある魚類への影響

コントロールエリアに対して酸性化エリアでは、魚種数は35-57%に低下した。これらの魚種の中で山田（1990）に記載された三崎港に水揚げされた魚種の個体数をカウントし、コントロールエリアに対する酸性化エリアの割合を求めると、58-74%へ低下していることが示された(図17)。すなわち、海洋酸性化の進行は漁業資源量に影響を及ぼし、供給サービスの低下を引き起こすことが示された。

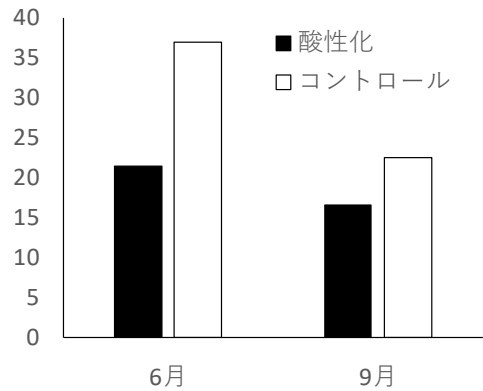


図17 有用魚種の個体数
縦軸は有用魚種の個体数の総和を示す。

4. 文化的サービス

4.1. 観光業従事者の認知調査

式根島の2件のダイビング事業者に聞き取りを行った結果、1件は海水浴場周辺を主要なサイトとしており、CO₂シープのある御釜湾は含まれていなかった。しかし、もう一件の事業者は、御釜湾とその隣のヨロイと呼ばれる湾の2か所を回遊するツアーを頻繁に実施している。ヨロイはpHが通常の状態であることが既に明らかとなっていることから、この事業者は酸性化エリアとコントロールエリアの両

方を回遊するツアーを設けていることとなる。

この2か所を回遊するツアーに参加してインストラクターの指示通りに水中で撮影を行ったところ、コントロールサイトであるヨロイでは、魚類およびサンゴが水中景観の構成要素として数多く出現した。一方、酸性化エリアである御釜湾では、泡やウミガメが構成要素として写真の中に多く出現した(図18、表1)。この事実は、ダイビングの対象がこの2つのサイトで大きく異なることを意味している。

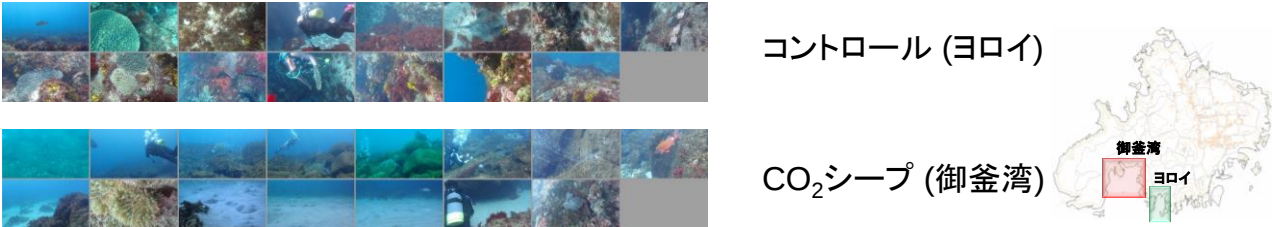


図18 ヨロイと御釜湾の回遊ツアーにおける水中景観

左図はそれぞれのサイトにおける水中写真。一定時間ごとに写真を抽出し、計15枚の写真を解析に使用。右図は御釜湾とヨロイの位置を示す。

表1 水中景観構成要素の数

		景観構成要素が存在した写真数(枚)		差の絶対値
		ヨロイ	御釜湾	
考慮した景観構成要素	岩	15	13	2
	砂地	5	7	2
	海藻	15	13	2
	泡	0	10	10
	魚類	11	4	7
	ウミガメ	0	4	4
	サンゴ	10	0	10
	付着生物	6	1	5

その一方で、ダイビングの対象の変化に関しては、泡の存在を注意深く取り扱うことが必要となる。海底から泡が発生するという光景は、他の海域では見ることのできない特異な光景であり、ダイビングの目玉ともなりうる大きな観光資源である。しかし、泡は疑似的な酸性化を引き起こす要因であり、酸性化の進行した未来の海に存在しえない要素であることから、一般的なダイビングの対象となる景観構成要素は減少する傾向があると言える。

4.2. サンゴへの影響評価

式根島のような温帯域は、冬季の低水温がサンゴに大きなストレスを与えている。しかし、温暖化に伴う水温上昇は低温ストレスを緩和し、好適な水温環境を作り出す可能性がある。その一方で、海洋酸性化の影響は高緯度からより強く現れることから、酸性化に関しては温帯域のサンゴは強く影響を受ける可能性がある。下田と式根島のコントロールエリアに移植したエンタクミドリイシを比較すると、冬季の成長が式根島のコントロールエリアにおいて大きくなる。これは、下田よりも式根島の水温が2℃ほど高く、低水温ストレスの程度が小さかったことを示唆している。一方、酸性化エリアとコントロールエリアを比較すると、酸性化エリアでの成長が有意に小さい。すなわち、温暖化によって生まれた成長促進効果が酸性化によって消失しており、酸性化と温暖化の複合的な影響が生じていることが明らかとなった。さらに、フタマタハマサンゴについても同様の検証をしてみると、本種では温暖化および酸性化の影響はほとんど観察されなかった。すなわち、フタマタハマサンゴは気候変動に対する耐性の強い種であることが明らかとなった(図19)。

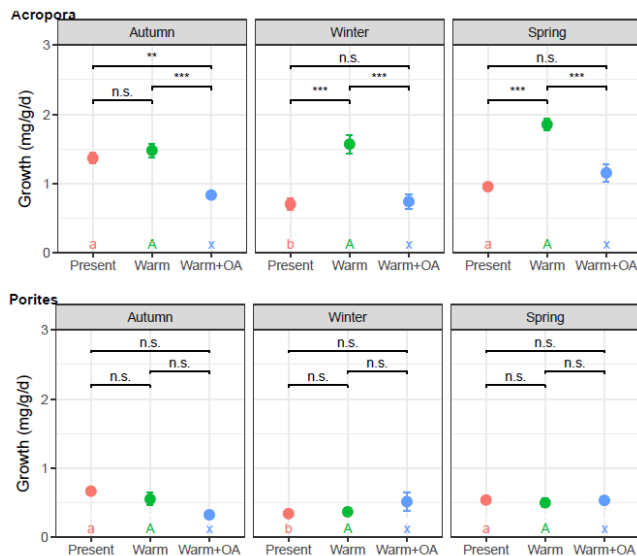


図19 移植したサンゴの成長

上図はエンタクミドリイシ、下図はフタマタハマサンゴを示す。

横軸は移植サイト。Present（下田）、Warm（式根島コントロール）、Warm+OA（式根島CO₂シープ）を示す。縦軸は成長速度を示す。

4.3. 魚群の持つレクリエーションの価値

スコア化した魚群のレクリエーションの価値は、コントロールエリアと比較して酸性化エリアにおいて15-16%にまで低下した(図20)。魚群調査の結果から、熱帯性のサンゴなどを生息場とする魚種の減少が顕著であったことが示されており、レクリエーションダイビングとなるカラフルな種がみられなくなったことに起因すると考えられる。

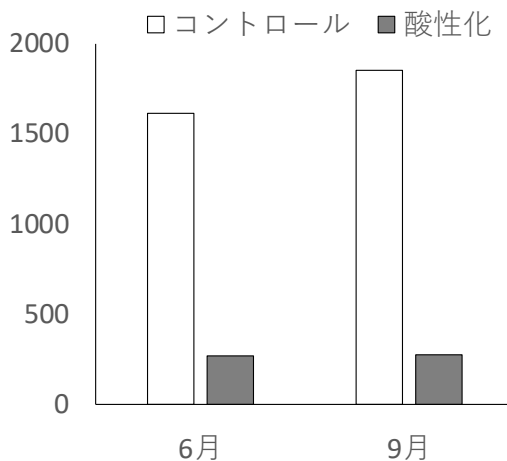


図20 魚群のレクリエーションの価値
縦軸は重みづけしたスコアを示す。

4.4. レクリエーション機能に関する支払い意思額の定量

回答期間を2020年2月2日（日）～2月20日（木）の19日間とし、有効回答は396名となった。回答者の属性に関する回答を表1に示す。回答者に占めるダイビング関係者の割合は、13.4%と高くないため、一般的なレジャーダイバーの意見を収集することができたと考えられる。

ダイビングを仕事にしている回答者を除くと、過去2年のダイビング本数の平均値は59本となり、約年間30本となる。レジャー白書(公益財団法人 日本生産性本部, 2018)によれば、ダイビング人口は80万人で、市場規模は1,440億円(80万人×30本×6,000円)と推計される。

ダイビングに適した海洋景観は、大多数がサイトA（コントロール）を選択することが示された（表2）。このような評価が得られたのは、コントロールサイトは酸性化サイトに比べ、「サンゴとそこに生息する生物」および「多種多様な生き物」が評価されたといえる（表3）。一方で、サイトB（酸性化）を選択した回答者は、「ダイナミックな地形」と「おだやかな景観」を好む傾向が示された（表3）。酸性化が進んだ場合、レクリエーション機能の価値は大幅に減ずると推測される。

サイトAとサイトBの違いは環境変化によるものであると説明したうえで、その変化を防止するため

の費用の支払い意思額を聞いたところ、支払いたくないという回答はごく少数であり、ダイビング費用の5%~10%の負担が最も多い回答となった（図21）。それぞれの支払い額の中央値を各段階の支払い金額とし、平均額を計算すると、904円となった（表4）。この金額は、よく訪れるダイビングスポットの環境保全のための支払い意思額の平均（847円）よりも高くなった。仮に、80万人のダイビング人口の92.9%が年間30本で、景観変化を防止するための費用（904円）を負担したとすれば、レクリエーション機能を維持するために約202億円の価値があると考えられる。

表 1 アンケート回答者の属性

年齢	10代	1.3%	職業	公務員	5.8%
	20代	21.5%		会社役員・経営者	5.6%
	30代	25.5%		会社員	55.6%
	40代	24.5%		自営業	12.1%
	50代	21.7%		パート・アルバイト	3.5%
	60代	4.8%		主婦・主夫	2.5%
	70代以上	0.5%		学生	9.6%
	回答しない	0.3%		無職	1.8%
性別	男性	53.5%	職種	ダイビング関係	13.4%
	女性	46.2%		1年以下	10.1%
	回答しない	0.3%		2-5年	26.6%
居住地	北海道・東北	3.1%	ダイビング歴 (年数)	16-25年	18.0%
	関東	64.9%		26-51年	8.9%
	北陸	2.6%		0-1回	9.6%
	中部	7.2%		6-10回	11.6%
	近畿	11.0%		11-100回	62.0%
	中国・四国	2.6%		101-300回	13.7%
	九州・沖縄	8.7%		301-1000回	3.0%
				過去2年間の 年間本数	

N=396

表 4 環境保全のための支払意思額の平均

	支払意思額 の平均
よく訪れるダイビングスポットの環境保全	847円
海洋環境の変化による景観変化防止	904円

注) 1ダイビング6000円に上乗せで支払うと仮定
t検定 (p<0.05) で有意差を確認

表 2 望ましい海洋景観

	サイトA (コントロール)	サイトB (酸性化)
ダイビングしたい海洋景観	87.6%	12.4%
将来世代に残したい海洋景観	92.9%	7.1%

* T検定 (p<0.05) 有意差あり

表 3 海洋景観構成要素の違い

	全	A	B	差
1 サンゴとそこに生息する生物	6	6	3	-3
2 多種多様な生き物	5	5	1	-4
3 特徴的な生物	4	4	4	0
4 ダイナミックな地形	3	3	6	3
5 おだやかな景観	2	2	5	3
6 海藻とそこに生息する生物	1	1	2	1

「非常に当てはまる」の回答者数が多い順に点数化した。サイトAとBの回答者で順位に差があったものを色付けして示している。

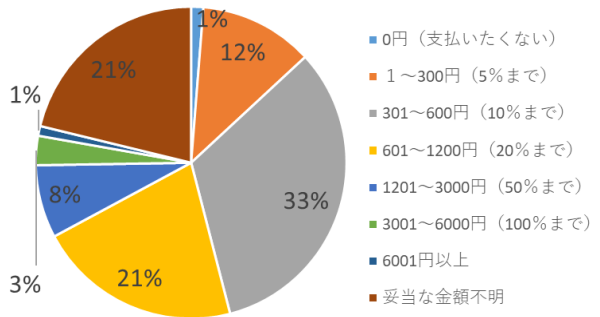


図21 海洋景観変化防止のための支払意思額

5. 各サービスの変化のレーダーチャート化

各生態系機能の項目に関して、コントロールエリアを1とした時の酸性化エリアの値をレーダーチャートとしてあらわした（図22）。酸性化エリアはpCO₂濃度が概ね900ppm前後の海域を代表値として用いた。基盤サービスの中の生息場に関しては、1. 1. で示したベントスが作り出す海底の複雑性を用いており、動物の多様性はマクロベントスの多様性指数の変化を利用した。栄養塩(1. 2.)に関しては、現段階で公表データとなっていないことから除外した。調整サービスに含まれる藻類の光合成および分解性に関しては、2. 1. で示した現場の光合成生産量と2. 2. で示した160~300℃の温度帯における熱分解性を用いている。供給サービスについては、漁師の認知(3. 1.)および貝の殻(3. 2.)への影響は定性的な評価であったことから数値は示していないが、ともに負の影響であったことが示されている。水産有用魚類の項目は、市場価値のある魚類の個体数(3. 3.)の変化を用いた。文化的サービスでは、水中景観に対する観光業従事者の認知に関して、魚とサンゴの景観構成要素数の変化を用いている(4. 1.)。サンゴの成長に関しては、実験に用いた2種のサンゴの成長の平均値とした(4. 2.)。観光有用魚類への影響は、スコア化した魚類のレクリエーションにおける価値(4. 3.)を用いている。

個々の科学的知見を生態系サービスとしてあらわし政策決定などに利用していく際には、そのディスプレイの方法が重要であり、レーダーチャートは有効な表現方法の一つである(Nunes et al., 2014)。結果的に、調整機能については海洋酸性化の影響はさほど大きくない一方で(97-106%)、他のサービスは24-79%にまで低下した。すなわち、海洋酸性化の影響の度合いはサービスの項目ごとに異なるが、全体的には概ね低下傾向を示すことが明らかとなった。

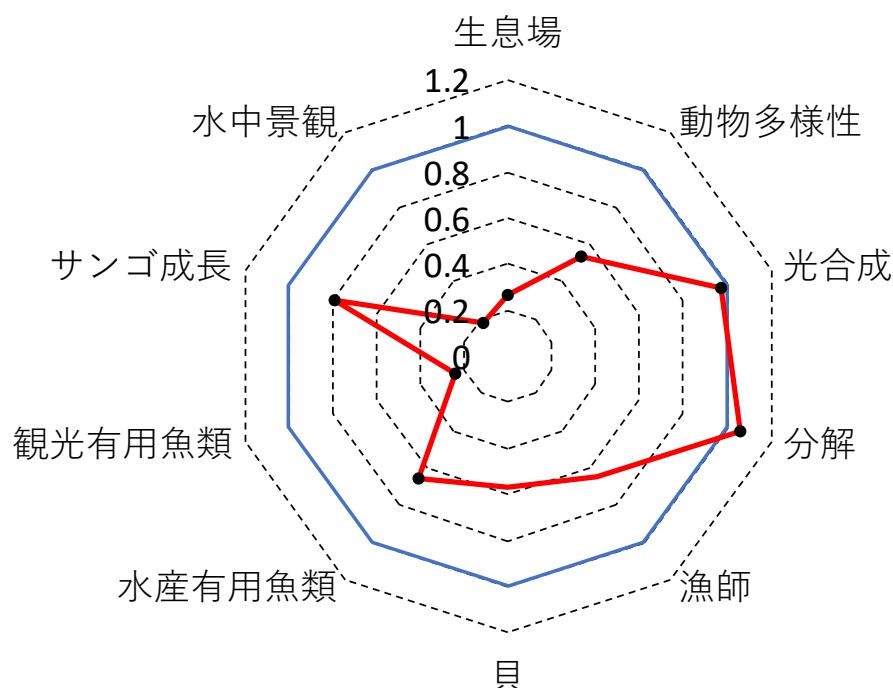


図22 各生態系機能のレーダーチャート

本研究の実施項目の中から、学会もしくは論文等で公表済みもしくは公表予定のものみの項目を含む。青い線はコントロールエリア(1とする)を示し、赤い線は酸性化エリアの値を示す。「漁師」・「貝類」の項目は、定性的な評価のみであったため、数値を示していない。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究は日本近海の温帯域で初めて発見されたCO₂シープにおいて、(a)生物多様性の実態を把握するとともに、(b)生息場の提供、(c)炭素隔離、(d)漁業生産物の提供、(e)ダイビング産業への貢献への影響を明らかにし、(f)生態系サービスの変化を包括的に予測することを目的とする。(a)に関しては、石灰化生物や大型の藻類の減少、マット状の藻類の増加を示すことに成功し、温帯域においても劇的な生態系の変化が生じることを明らかにした。(b)に関しては、付着性のベントスの変化が小型動物の生息場を減少させるという結果を明らかにし、酸性化に対する海洋生態系の直接的な応答だけでなく間接的な応答も示すという点は新規性も高く、科学的意義が大きい。(c)に対しては、酸性化が光合成を増大するという一般的知見に対して、影響は限定的であることを明らかにした。光合成は生態系の基盤を為す重要なプロセスであるにもかかわらず、自然の生態系を用いて酸性化に対する応答を検証した例は無く、本研究の結果は大きな意義を持つ。個々の生物への影響について、実験室下における検証例は数多く報告されているが(McClintock et al., 2009; Lischka et al., 2011)、現場環境での報告例は数少ない。(d)に関しては環境DNAによる魚類相調査および貝類への影響評価を予定していたが、魚類相調査については直接の魚群カウントに切り替え、酸性化に伴う魚種の減少を明らかにした。また、貝類は殻形成への阻害が明らかとなった。魚類相の結果を基に漁業資源量を見積もったところ、有用魚種数の減

少も認められ、これは式根島の漁業従事者が酸性化エリアを漁場として忌避する傾向と整合的である。(e)に関しては、ダイビングの対象となる魚類やサンゴに対する酸性化の負の影響を示し、ダイビング事業者の行動にも負の影響が生じることが明らかとなった。特に、(d)および(e)で評価した、漁業やダイビング事業者への調査といった社会科学的アプローチは、酸性化研究において世界でも初の事例であり、高い新規性・科学的意義を有する。これらの結果を基に、(f)に関する生態系サービスの評価を実施した。この際、サービスの変化の相対値をレーダーチャートに示すことで、海洋酸性化の影響を包括的に示すことに成功した。これらの成果は海洋酸性化研究の中でも例の無い新しい試みであり、(a)-(f)に関する当初目標はプロジェクト期間中に達成された。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

国際的な報告書や目標への貢献：IPBESの地球規模の評価報告書第2稿において、海洋酸性化の生態系への影響についての情報提供に貢献できる。2018年6月29日までの間に実施された外部レビューにおいて専門家としてレビューを行い、情報をインプットした。また、IPCCの第5次報告書においても海洋酸性化の記述は極めて少なく、特定の生物群へのネガティブな影響が述べられているに過ぎない。本プロジェクトの成果は、人間活動に対する酸性化の影響を実証的に示す初の知見であり、成果は順調に学術論文として公表されていることから、環境政策への貢献(国際貢献)の一つである、IPCCの次期報告書作成に資するものと考えられる。また、生物多様性条約の愛知目標10において、2015年までに海洋酸性化から影響を受ける脆弱な生態系への人為的圧力の最小化、健全性と機能の維持がうたわれている。本プロジェクトは、日本近海温帯域の典型的藻場も生態系の激変が生じる脆弱な生態系であることを示しているだけでなく、生態系サービスという尺度で生態系の機能評価をするという点で貢献度が高い。

国内における取り組みへの貢献：2017年7月に環境省より出された、「生物多様性分野における気候変動への適応について当面の具体的取組」に貢献が期待される。この中では、気候変動による生物多様性および生態系サービスへの影響の把握が盛り込まれており、酸性化に伴う生態系の生物多様性の変化や生態系サービスの変化をとらえる本プロジェクトは目的が完全に合致している。その他、生態系を活用した適応策の推進もうたわれており、式根島島民の酸性化エリアの利用形態は、将来起こりうる適応の形であると言えることから、適応策の具体的な策定における根拠としても重要度が高い。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) S. Wada, M. Ishii, N. Kosugi, D. Sasano, W. Matsushita, Y. Omori, T. Hama: J. Oceanogr. (in press)

Seasonal dynamics of seawater CO₂ system at a coastal site near the southern tip of Izu Peninsula, Japan.

- 2) B. P. Harvey, S. Agostini, K. Kon, S. Wada, J. M. Hall-Spencer: Diversity, 11, 12, 242

(2019)

Diatoms dominate and alter marine food-web when CO₂ rises.

- 3) J. M. Hall-Spencer, B. P. Harvey: Emerging Topics in Life Sciences, 3, 197-206

Ocean acidification impacts on coastal ecosystem services due to habitat degradation.

- 4) 氏家萌美、武正憲、原光宏、和田茂樹：環境情報科学学術研究論文発表会、32, 227-232 (2018).

式根島浅海域CO₂シープに対するダイビング事業者と漁業従事者の認識

- 5) 和田茂樹、アゴスティーニシルバン：地球化学、51, 195-205 (2017)

沿岸の一次生産者に対する海洋酸性化の影響-CO₂シープにおける生態系の変化-

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, K. Kon, M. Take: JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Makuhari, Japan, 2020（登録受理済み）

Effects of ocean acidification on marine ecosystem services: use of natural analogues around volcanic CO₂ vents.

- 2) 和田茂樹：ワークショップ「海洋酸性化問題と二酸化炭素回収貯留(CCS)技術」（2018）

式根島CO₂シープで見られる未来の海

- 3) S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, Y. Omori, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018

Photosynthetic activity of early successional phytobenthos at a shallow CO₂ seep off Shikine Island, Japan.

- 4) S. Agostini, B. P. Harvey, S. Wada, K. Kon, M. Milazzo, K. Inaba, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018

Ocean acidification drives community shifts towards simplified non-calcified habitats in a subtropical-temperate transition zone.

- 5) S. Kurosawa, S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, M. Milazzo, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018

Effects of ocean acidification on net community production in coastal ecosystems: In situ assessment in natural CO₂ seeps.

- 6) B. P. Harvey, S. Agostini, S. Wada, K. Inaba, J. M. Hall-Spencer: PICES-2018 Annual Meeting, Yokohama, Japan, 2018

Dissolution: the Achilles' heel of gastropods in an acidifying ocean.

- 7) 武正憲、原光宏、和田茂樹：第129回森林学会大会（2018）

富士箱根伊豆国立公園式根島における浅瀬（浅海域）CO₂シープの観光価値

- 8) S. Kurosawa, S. Wada, S. Agostini, B. P. Harvey, M. Milazzo, J. M. Hall-Spencer: 2018 Ocean Science Meeting, Portland, USA, 2018

Effects of ocean acidification on photosynthesis in coastal ecosystems: In situ assessment in natural CO₂ vents.

- 9) 和田茂樹：第33回国際生物学賞記念シンポジウム

Ocean acidification and energy flow in marine ecosystems.

- 10) S. Agostini: 第33回国際生物学賞記念シンポジウム

Tropicalization of coastal marine ecosystems: From macroalgae to corals?

- 11) 和田茂樹、S. Agostini, B. P. Harvey, 今孝悦、J. M. Hall-Spencer、稲葉一男：2017年環境

研究シンポジウム

CO₂シープを用いた海洋酸性化の進行に対する生態系の将来予測

- 12) 和田茂樹、Agostini Sylvain、Ben Harvey、大森裕子、濱健夫、Marco Milazzo、Jason Hall-Spencer：2017年度日本海洋学会秋季大会（2017）
付着性藻類の光合成に対する海洋酸性化の影響-CO₂シープを利用した解析-
- 13) S. Agostini: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
Future of marine ecosystems at the transition zone between subtropical and temperate: insights from a CO₂ seep on the Japanese Pacific Coast.
- 14) B. P. Harvey: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
The role of mat-forming algae in positively reinforcing an ecological shift: a CO₂ seep case study.
- 15) S. Wada: International Workshop. Assessing the Effects of Ocean Acidification on East Asian Ecosystems, Shimoda, Japan, 2017
Natural variability of carbonate chemistry in southern coastal region of Japan.

（３）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 筑波大学下田臨海実験センター 式根島講演会（主催：筑波大学下田臨海実験センター、2017年5月11日、式根島開発センター2階研修室、観客約30名）にて、「海洋酸性化が生態系に及ぼす影響-式根の海から見えてきたこと-」（講演者：和田茂樹）、「島嶼地域ならではのエコツーリズムの可能性」（講演者：武正憲）について講演。式根島における研究成果が島民へ紹介された。
- 2) 琉球大学熱帯生物圏研究センター市民公開シンポジウム：環境と生物-生物の営みと環境-（主催：琉球大学熱帯生物圏研究センター、2017年7月9日、那覇県立博物館・美術館講座室、観客約50名）にて、「第二のCO₂問題：海洋酸性化」（講演者：和田茂樹）について講演。海洋酸性化の世界的な動向と、式根島CO₂シープを利用した研究活動を紹介した。
- 3) 筑波大学下田臨海実験センター一般公開（主催：筑波大学下田臨海実験センター、2017年12月9日、筑波大学下田臨海実験センター、参加者約50名）にて、「Tara号の冒険：世界のサンゴ礁と生態系の未来のために」（講演者：Agostini Sylvain）について講演。式根島におけるサンゴの調査内容が紹介された。
- 4) 新島地区PTA連合協議会講演会（主催：新島地区PTA連合協議会、2019年11月23日、式根島開発センター2階研修室、観客約30名）にて、「海の環境の過去・現在・未来-世界から注目される式根島の海-」（講演者：和田茂樹）について講演。海洋環境の過去から未来にかけての変化を講演し、特に式根島での海洋酸性化の影響についてフォーカスした。

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞（2018年7月25日、全国版夕刊およびデジタル、1頁、「酸性化進む海 生態系の影響は式根島付近で調査」）

- 2) ダイビングと海の総合サイト「オーシャナ」(2020年2月12日)「【1】海洋酸性化が進んだ未来の海が式根島にあった！～筑波大学下田臨海実験センターの研究～」,
<https://oceana.ne.jp/tsukuba01>
- 3) ダイビングと海の総合サイト「オーシャナ」(2020年2月13日)「【2】自然の価値をお金に換算すると、その重要さが理解しやすくなるのでは？～酸性化への社会科学的アプローチ～」
<https://oceana.ne.jp/tsukuba02>
- 4) ダイビングと海の総合サイト「オーシャナ」(2020年2月14日)「【3】ダイバーの持っている情報を未来予測に使いたい！～過去の履歴を知ることによって海洋酸性化を正確に分析する～」
<https://oceana.ne.jp/tsukuba03>

(6) その他

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- Agostini, S., Wada, S., Kon, K., Omori, A., Kohtsuka, H., Fujimura, H., Tsuchiya, Y., Sato, T., Shinagawa, H., Yamada, Y., Inaba, K., 2015. Geochemistry of two shallow CO₂ seeps in Shikine Island (Japan) and their potential for ocean acidification research. *Regional Studies in Marine Science* 2, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.07.004>
- Cooley, S.R., Kite-Powell, H.L., Doney, S.C., 2009. Ocean Acidification's Potential to Alter Global Marine Ecosystem Services. *Oceanography*.
- Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A., Kleypas, J.A., 2009. Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science* 1, 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- Dring, M.J., 1998. *The Biology of Marine Plants*. Univ. Press, Cambridge.
- Gao, K., Aruga, Y., Asada, K., Ishihara, T., Akano, T., Kiyohara, M., 1991. Enhanced growth of the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda in high CO₂ concentrations. *Journal of Applied Phycology* 3, 355–362.
- Hall-Spencer, J.M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S.M., Rowley, S.J., Tedesco, D., Buia, M.-C., 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454, 96–99. <https://doi.org/10.1038/nature07051>
- Harvey, B.P., Agostini, S., Wada, S., Inaba, K., Hall-Spencer, J.M., 2018. Dissolution: The Achilles' Heel of the Triton Shell in an Acidifying Ocean. *Frontiers in Marine Science* 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00371>
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., Duarte, C.M., Gattuso, J.-P., 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. *Global Change Biology* 19, 1884–1896. <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>
- Kuczynska, P., Jemiola-Rzeminska, M., Strzalka, K., 2015. Photosynthetic Pigments in Diatoms. *Marine Drugs* 13, 5847–5881. <https://doi.org/10.3390/md13095847>
- Lischka, S., Büdenbender, J., Boxhammer, T., Riebesell, U., 2011. Impact of ocean acidification and elevated temperatures on early juveniles of the

- polar shelled pteropod *Limacina helicina*: mortality, shell degradation, and shell growth. *Biogeosciences* 8, 919–932.
<https://doi.org/10.5194/bg-8-919-2011>
- McClintock, J.B., Angus, R.A., McDonald, M.R., Amsler, C.D., Catledge, S.A., Vohra, Y.K., 2009. Rapid dissolution of shells of weakly calcified Antarctic benthic macroorganisms indicates high vulnerability to ocean acidification. *Antarctic Science* 21, 449–456.
<https://doi.org/10.1017/S0954102009990198>
- Midorikawa, T., 2005. Persistently strong oceanic CO₂ sink in the western subtropical North Pacific. *Geophysical Research Letters* 32.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021952>
- Munday, P.L., Cheal, A.J., Dixon, D.L., Rummer, J.L., Fabricius, K.E., 2014. Behavioural impairment in reef fishes caused by ocean acidification at CO₂ seeps. *Nature Climate Change* 4, 487–492.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2195>
- Nunes, P.A.L.D., Kumar, P., Dedeurwaerdere, T., 2014. *Handbook on the Economics of Ecosystem Services and Biodiversity*. Edward Elgar Pub, Cheltenham, UK; Northampton, MA.
- Trevathan-Tackett, S.M., Kelleway, J., Macreadie, P.I., Beardall, J., Ralph, P., Bellgrove, A., 2015. Comparison of marine macrophytes for their contributions to blue carbon sequestration. *Ecology* 96, 3043–3057.
<https://doi.org/10.1890/15-0149.1>
- Xu, D., Schaum, C.-E., Lin, F., Sun, K., Munroe, J.R., Zhang, X.W., Fan, X., Teng, L.H., Wang, Y.T., Zhuang, Z.M., Ye, N., 2017. Acclimation of bloom-forming and perennial seaweeds to elevated *p* CO₂ conserved across levels of environmental complexity. *Glob Change Biol* 23, 4828–4839. <https://doi.org/10.1111/gcb.13701>
- 公益財団法人 日本生産性本部, 2018. 公益財団法人日本生産性本部 - レジャー白書 2018 ―余暇の現状と産業・市場の動向― [WWW Document]. URL <https://bookstore.jpc-net.jp/detail/books/goods003932.html> (accessed 5.28.20).
- 山田和彦, 1990. 神奈川県三崎魚市場に水揚げされた魚類. 神奈川自然誌資料 11, 95–102.

III. 英文Abstract

Effects of Ocean Acidification on Ecosystem Services: an Investigation Using a CO₂ Seep

Principal Investigator: Shigeki WADA

Institution: University of Tsukuba

1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-City, Ibaraki 305-8577, JAPAN

Tel: +81-558-22-6740 / Fax: +81-558-22-0346

E-mail: swadasbm@shimoda.tsukuba.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Ocean acidification, Ecosystem services, CO₂ seep, Biodiversity, Carbon sequestration, Food provision, Recreation

Ocean acidification (OA) due to rising anthropogenic CO₂ levels can lead to drastic shifts in the communities of marine ecosystems, and such effects will have severe consequences for human lives. Due to the presence of a CO₂ seep off Shikine Island, the ecosystems nearby can be used as a natural analogue of OA. Utilising interdisciplinary collaborations between natural and social scientists, we use this study site to evaluate the effects of OA on ecosystem services.

We assessed supporting (habitat formation, nutrient cycling), regulating (carbon sequestration), provisioning (food supply) and cultural (recreation) services. In the high CO₂ area, the abundance of corals and canopy-forming algae were reduced compared to the control sites while low-profile or turf algae dominated, leading to the loss of habitats for benthic fauna and fishes. Surveys of the macrobenthos and fish communities showed a decline in species diversity in the high CO₂ area.

Under high CO₂ conditions, the photosynthetic activity of benthic algae is predicted to be enhanced. Using the community that recruited onto settlement panels, we found that the community net photosynthesis was indeed enhanced. However, the measurement of photosynthesis *in situ* on established communities showed no CO₂ fertilization effect, implying that the increase of regulating services would be limited to the early succession phase of benthic community.

The provision of products derived from the marine environment will also be reduced due to the changes in ecosystems. The thickness and density of the tritons' shells were lower in the high CO₂ site, implying negative impacts on gastropods. The abundance of commercially important fish was reduced by 58-74% under high CO₂ conditions. These findings were also consistent with the behavior of fishermen, whereby we found out that the fisherman would actively avoid the area around the CO₂ seep in their fishery activity.

The shifts in fish community also showed a decrease in the number of colorful tropical or subtropical fish species, which are a major interest of recreational divers. Since coral represent a major resource for tourism and recreational diving, we also assessed the impact of OA on coral growth. The impact of OA was variable among species, with massive corals capable of surviving under high CO₂ conditions, while the branching species appeared to be

more susceptible. Analysis of the seascape using photos taken by the tourists also showed that a great number of the organisms valuable for tourism and recreation were declining.

In summary, most of the ecosystem services will be negatively impacted by ocean acidification (high CO₂ site: 24-79% of the values in control site) with the exception of regulating services (97-106%). These estimates suggest that OA will reduce the quality of human lives.