

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04234

研究課題名(和文) 海洋酸性化に対する海藻藻場生態系のエネルギーフローの応答

研究課題名(英文) Response of Energy flow in Algal bed Ecosystems against Ocean Acidification

研究代表者

和田 茂樹 (Wada, Shigeki)

筑波大学・生命環境系・助教

研究者番号：60512720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：式根島CO<sub>2</sub>シープを利用し、光合成によるエネルギー獲得と、獲得したエネルギーの行方を解析した。付着基盤を設置して得られた自然群集の光合成生産量は、高CO<sub>2</sub>海域において有意に高くなり、光合成に対する施肥効果が示唆された。一方で、藻類のバイオマスの増大は見られない。この要因として、藻類が海底から脱離し輸送される過程が強化され、沿岸生態系から外部へのエネルギーの移動が生じることが示唆された。さらに、脱離した藻類の生態系への影響として、海底に付着した状態の藻類群集と、脱離して海底を漂う藻類に付着する動物群集の比較を行ったところ、動物群集に大きな変化が表れており、高次栄養段階に対する影響も示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギーフローの基盤となる光合成が増大する一方で、バイオマスが増大しないという結果は、エネルギーの移行経路が海洋酸性化で変化することを意味する。特に、藻類群集の変化から脱離の影響が示唆され、海藻藻場内だけでなく系外とのやり取りも含めてエネルギーの移行過程を解析する必要性が示された。また、海藻の葉上に付着する生物群集は脱離前後において大きく変化する。主に一次消費者と考えられる生物群集の変化は、海藻藻場における高次栄養段階生物へのエネルギー流の変化を示唆している。これらの成果は、エネルギーフローだけでなく、炭素循環における変容も示唆しており、ブルーカーボンなどへの影響も大きな懸念事項となる。

研究成果の概要(英文)：We used the CO<sub>2</sub> Sheep of Shikine Island to analyze the acquisition of energy through photosynthesis and the fate of the fixed energy. The photosynthetic production of the natural community obtained by deploying attachment substrates was significantly higher in high-CO<sub>2</sub> areas, suggesting a fertilization effect on photosynthesis. On the other hand, there was no increase in algal biomass. One possible factor is that the process of algae detachment from the seafloor and transportation is enhanced, leading to the transfer of energy from coastal ecosystems to other ones. Furthermore, when comparing the algal community attached to the seafloor with the algae drifting away, the associated animal communities significantly changed, indicating potential effects on higher trophic levels.

研究分野：生物地球化学

キーワード：海洋酸性化 CO<sub>2</sub>シープ エネルギーフロー 光合成 脱離

## 1. 研究開始当初の背景

人間活動によって排出された CO<sub>2</sub> の約 20% は海に吸収されており、海洋表層の炭酸系の化学平衡に影響を及ぼす。これは海洋酸性化と呼ばれており、生物や生態系に及ぼす影響が懸念されている。個々の生物に対して水槽などを使って実施されてきた影響試験では、石灰化生物への阻害作用や一次生産者の光合成の増大などが示されているが、この影響は一様ではなく種ごとに大幅に異なる。これらの影響は生物相の変化をもたらすだけでなく、生態系内のエネルギーフローにも波及する可能性がある。

生態系全体への影響を評価する上で、海底から CO<sub>2</sub> の噴出する CO<sub>2</sub> シープと呼ばれる海域の利用が有効となる。噴出部の周辺海域には高 CO<sub>2</sub> 濃度にさらされた生態系が広がり、海洋酸性化を評価するための自然の実験室として利用されている。伊豆諸島式根島の周辺海域は、海藻藻場を主体としつつサンゴが点在する暖温帯における典型的な沿岸生態系である。さらに式根島の一角では CO<sub>2</sub> シープが発見されており、生態系の変化をとらえる絶好の研究サイトとなっている。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、式根島 CO<sub>2</sub> シープを対象海域とし、生態系の変化とその結果として生じるエネルギーフローの応答を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 光合成への影響

式根島 CO<sub>2</sub> シープの高 CO<sub>2</sub> 海域と通常海域に生物が付着できる基板を海中に係留し、一定期間置くことで基板表面に付着生物の自然群集が形成される。プレートの一部を切り取り、係留海域周辺から採取した海水に入れて明条件で培養し、酸素濃度の変化から光合成生産量を求めた。さらに、基板表面に付着した生物群集をグルタルアルデヒドで固定したものを顕微鏡で観察し、付着群集の解析を行った。

### (2) 葉上動物群集

本研究では、海底に付着した状態の海藻葉上の動物は、古典的食物連鎖を主体としたエネルギーフローを構成し、海底から脱離した海藻葉上では、腐食連鎖が卓越するとして、動物相の解析を行った。海底に付着した海藻に関しては、エアリーフトサンプラーを用いて吸引して採取し、脱離した海藻は対象海域近傍の砂底に漂っているものをメッシュバックに入れて採取した。それぞれの試料から 1 mm 以上のマクロベントスを回収し、種同定および個体数の計数を行った。

### (3) 生態系モデル

先行研究において、高 CO<sub>2</sub> 海域における生態系の変化は、小型の藻類の優占がトリガーとなることが示されている (Harvey et al. 2021)。その影響は、生物相の変化の要因となり、最終的にエネルギー流に波及する。そこで、小型の藻類と大型の藻類の競合関係に着目して生態系モデルを構築し、変化が生じるメカニズムの解明に取り組んだ。

## 4. 研究成果

### (1) 光合成の応答と有機物の行方の評価

光合成生産量は、高 CO<sub>2</sub> 海域に設置した基板上の藻類群集で有意に高く、高 CO<sub>2</sub> 環境下の群集が高いエネルギー獲得能を有することが示された。一方で、高次栄養段階生物にとっては、一次生産者が獲得したエネルギーが食物源となるバイオマスに変換されることが重要となる。藻類群集のバイオマスをクロロフィル a で評価すると、海域間でほとんど違いは認められず、バイオマスとしての増大には制限がかかっていることが示された。このような、光合成/バイオマス比

の変化は、優占する藻類の種の変化に起因する。通常海域に係留した基板には、海藻と思われる多細胞の藻類の幼体が多く付着している一方で、高 CO<sub>2</sub> 海域には単細胞の珪藻類(主に *Biddulphia* 属)が優占する。海藻は基質に付着する際に、仮根と呼ばれる付着器官を用いて接着する。一方で、珪藻などの微細藻類は、粘液を体外に分泌して基質に定着する。粘液は、海底への付着力が弱いと考えられることから、弱い波浪で脱離して系外に輸送されると考えられる。結果的に、バイオマスとして生成したエネルギーは沿岸生態系内に保持されず、系外に輸送されることが示された。

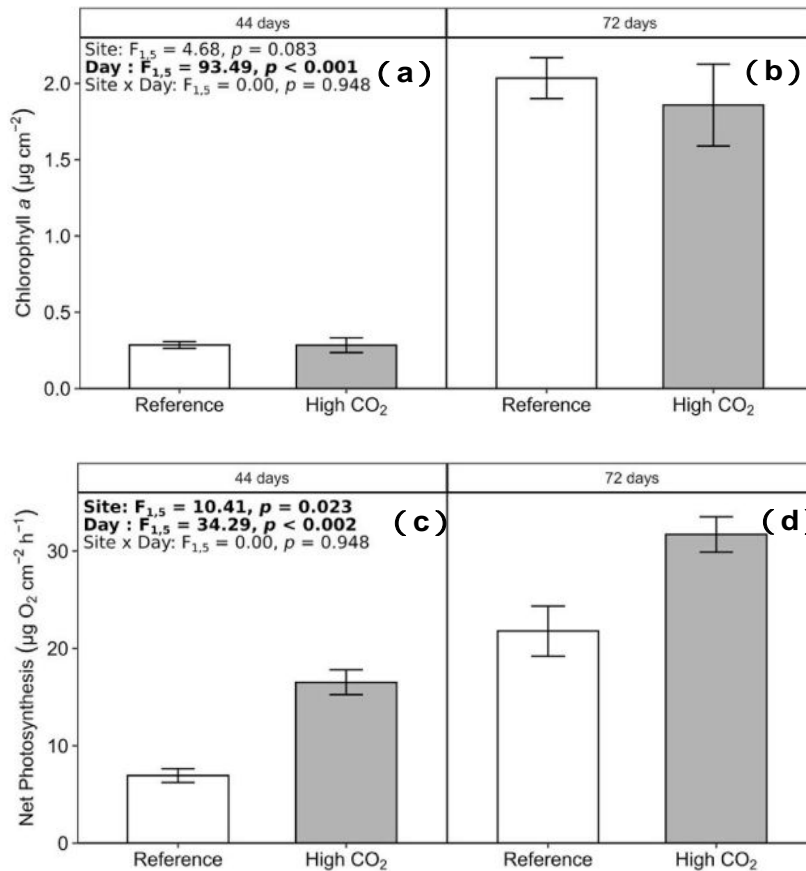


図 1. 通常海域と高 CO<sub>2</sub> 海域のバイオマスと光合成の比較  
 白と灰色の棒グラフは、通常および高 CO<sub>2</sub> 海域を示す。  
 44 日後(a,c)と 72 日後(b,d)に回収した試料のバイオマス(a,b)及び光合成(c,d)を示す。

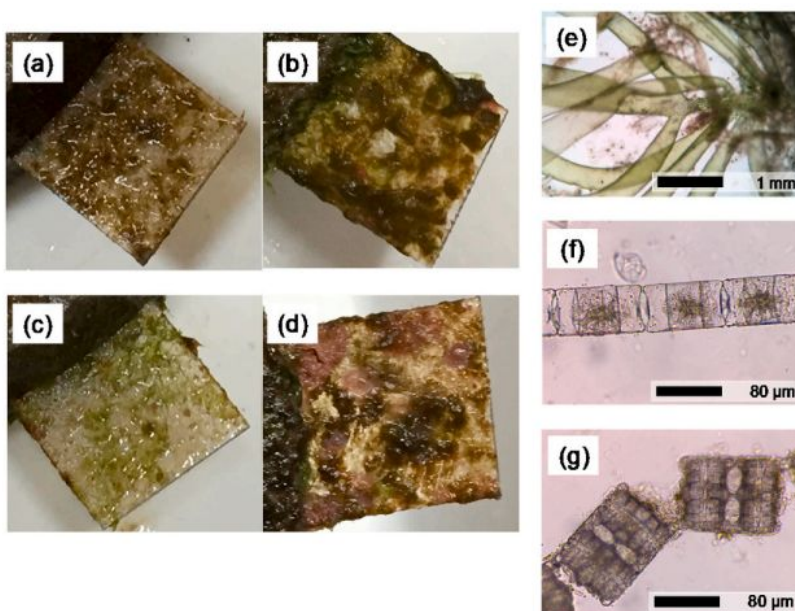


図 2. 通常海域と高 CO<sub>2</sub> 海域に係留した付着基板上的藻類  
 44(a,c)および 72 日目(b,d)に高 CO<sub>2</sub>(a,b)および通常海域(c,d)から回収した基板の写真を示す。通常海域(e)および高 CO<sub>2</sub> 海域(f,g)の顕微鏡写真を示す。

## (2) 葉上の動物相

エアリフトサンプラーで採取した、海底に付着している海藻の葉上動物の多様性(Shannon Index)は、通常海域と比較してやや低下する傾向を示した(PERMANOVA,  $p < 0.05$ )。一方で、漂っている藻体上の動物相には有意な差は認められない(PERMANOVA,  $p = 0.163$ ) (図)。先行研究において、高 CO<sub>2</sub> 海域の海底に付着する藻類葉上の動物相の多様性低下は既に認められており、小型の藻類が優占することで海底の構造が失われた結果と考えられている(Harvey et al. 2018)。漂っている海藻に関しては、水中における三次元的構造が付着時と大きく異なっていることが、多様性の変化が認められなかった要因の一つとして考えられる。動物相の変化は、高次栄養段階へのエネルギーの転送過程に影響を及ぼすことを考慮すると、古典的食物連鎖は腐食連鎖よりも海洋酸性化の影響を受けやすいと考えられる。

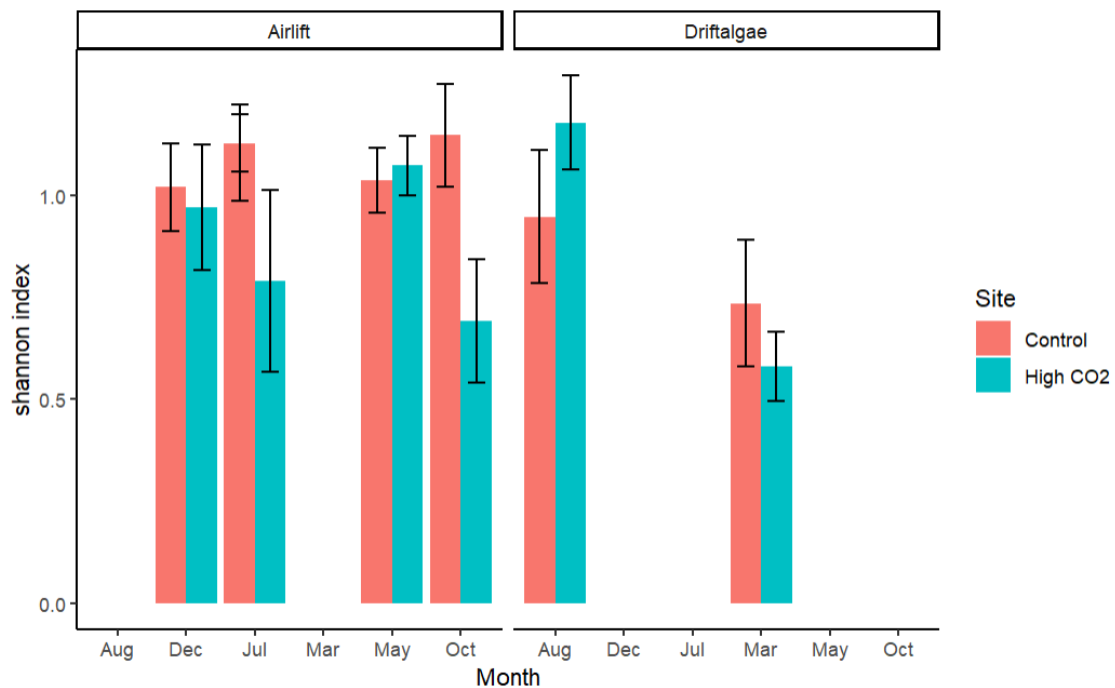


図 3. 動物の種多様性

通常海域(Control)と高 CO<sub>2</sub> 海域(High CO<sub>2</sub>)の多様性指数(Shannon index)を、海底に付着している海藻(Airlift)および漂っている海藻(Driftalgae)の葉上動物について示す。

## (3) 生態系のレジームシフト

小型藻類はより高 CO<sub>2</sub> に適応的であるとされており、海底面に生じたギャップに即座に加入し、生息場を速やかに占有する。さらに、海底に貧酸素層を形成し、大型の海藻の加入を阻害する。これらの影響を数理モデルに組み込むと、大型海藻と小型藻類の 2 者からなる生態系は双安定性を生じることが理論的にも示された。これが、生態系の変化を引き起こすトリガーとなり、海底の生物多様性の変化や生態系の構造変化をもたらすことが示された。

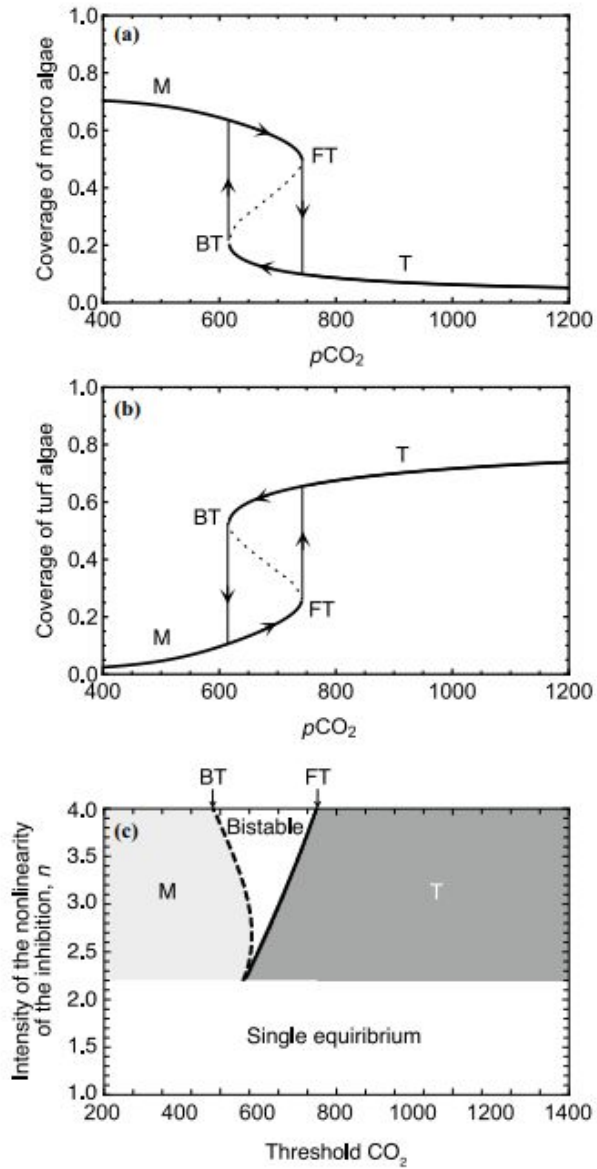


図 4. 数理モデルで示す大型海藻と小型藻類の競合

大型海藻(macro algae : a)と小型藻類(turf algae : b)の被度と CO<sub>2</sub> 濃度の関係を示す。大型海藻を主体とする生態系

通常海域 (Control) と高 CO<sub>2</sub> 海域 (High CO<sub>2</sub>) の多様性指数 (Shannon index) を、海底に付着している海藻 (Airlift) および漂っている海藻 (Driftalgae) の葉上動物について示す。大型海藻を主体とする生態系 (M) から、小型藻類を主体とする生態系 (T) への変化過程で双安定性の状態が生じることを示す (c)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wada Shigeki, Agostini Sylvain, Harvey Ben P., Omori Yuko, Hall-Spencer Jason M.	4. 巻 250
2. 論文標題 Ocean acidification increases phytoplankton carbon fixation and export in a warm-temperate system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Estuarine, Coastal and Shelf Science	6. 最初と最後の頁 107113 ~ 107113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ecss.2020.107113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Seto Mayumi, Harvey Ben P., Wada Shigeki, Agostini Sylvain	4. 巻 16
2. 論文標題 Potential ecosystem regime shift resulting from elevated CO2 and inhibition of macroalgal recruitment by turf algae	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Theoretical Ecology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12080-022-00550-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 和田茂樹
2. 発表標題 二酸化炭素の増えた未来の海で生態系の変化を探る
3. 学会等名 第7回海中海底工学フォーラム・ZERO（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nanako Kawakami, Shigeki Wada
2. 発表標題 Assessment of bacterial decomposition of macroalgal organic matter based on thermal degradation
3. 学会等名 ASLO 2021 Aquatic Science Meeting（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田茂樹
2. 発表標題 Effects of ocean acidification on marine ecosystem services: use of natural analogues around volcanic CO2 vents
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田茂樹
2. 発表標題 Effect of ocean acidification on marine ecosystem services: use of natural analogue around volcanic CO2 vents
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田茂樹
2. 発表標題 自然の高CO2生態系を利用した付着生物群集・生態系の将来予測
3. 学会等名 日本付着学会50周年シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田茂樹
2. 発表標題 未来の海を使って生態系の将来を探る
3. 学会等名 海洋生物シンポジウム2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	瀬戸 繭美 (Seto Mayumi) (10512717)	奈良女子大学・自然科学系・助教  (14602)	
研究分担者	A G O S T I N I S Y L V A I N (Agostini Sylvain) (20700107)	筑波大学・生命環境系・助教  (12102)	
研究分担者	今 孝悦 (Kon Koetsu) (40626868)	東京海洋大学・学術研究院・准教授  (12614)	
研究分担者	佐藤 雄飛 (Satoh Yuhi) (50708120)	公益財団法人環境科学技術研究所・環境影響研究部・研究員  (81103)	
研究分担者	B E N J A M I N H A R V E Y (Harvey Benjamin) (70785542)	筑波大学・生命環境系・助教  (12102)	
研究分担者	大森 裕子 (Omori Yuko) (80613497)	筑波大学・生命環境系・助教  (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------