

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19151

研究課題名（和文）闇から青へ-超閉鎖海域の貧酸素水塊発生と海洋生物のカーボンフローの劇的变化

研究課題名（英文）Drastic changes carbon flow in marine organisms under anoxic water masses in hyperclosed seas.

研究代表者

嶋永 元裕（Shimanaga, Motohiro）

熊本大学・くまもと水循環・減災研究教育センター・教授

研究者番号：70345057

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：3つの海域中最も閉鎖性の高い大村湾海底では、通年夏季貧酸素水塊発生時に細菌食性のセンチュウ類やカイアシ類群集が優占し、貧酸素下で無気呼吸を行う硫酸還元菌細菌が海底でのカーボンフローにおいて重要な役割を果たす一方、ダークカーボン固定を行う細菌は季節を問わず存在し、海底条件が変われば劇的にカーボンフローがブルーからダークに回転するが、閉鎖性の低い八代海などでは、海底下の酸素濃度が貧酸素の基準を下回らずカーボンフローの劇的な回転は局所的であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉鎖性の最も高い大村湾では、夏季貧酸素発生時に小型底生生物群集中の化学合成細菌を主たる餌とする種具の割合が劇的に変化するが、ダークカーボン固定を行う細菌は季節を問わず海底堆積物深層に常に存在するためカーボンフローの劇的な変化が起きることを示唆した点が、本研究の学術的意義である。今世紀末までに温暖化の影響により海全体の酸素濃度低下懸念されるが、この低下が沿岸域の水産業などに与える影響を考えると、大村湾に次いで閉鎖性が高いが夏季貧酸素化が深刻とは言えない八代海海底生態系に今後十年単位で生じる変化に注目する必要があるだろう。

研究成果の概要（英文）：In the Omura Bay, the most enclosed sea among the three investigated inland seas, bacterivorous nematodes and copepods increased in the meiofaunal community in bottom sediment under seasonal hypoxia in each summer, where sulfate-reducing bacteria performing anoxic respiration, played important roles in carbon flow in sediment. Our study also showed that bacteria that perform dark carbon fixation are present in all seasons, which would lead to drastic rotation from “blue” to “dark” carbon flow as soon as seafloor conditions change in the area. On the other hand, in the sea floor in the other more opened areas, e.g. Yatsushiro Sea, Dissolved oxygen concentrations in bottom water were rarely below the criteria of hypoxia, suggesting that the effects of “carbon flow change” would be limited in those areas at present.

研究分野：海洋生態学

キーワード：貧酸素 ダークカーボン 食物連鎖 生物群集構造

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

貧酸素水塊は有害な還元物質蓄積を伴い、好気的な底生生物に甚大な影響を及ぼす一方、無酸素下でも数カ月間生存する微小生物群の存在が明らかになりつつある。近年我々は、例年夏季に強度の強い貧酸素水塊が発生する長崎県大村湾中央部において生物群集の時間変化を調べた。その結果、1) 微小底生生物の優占分類群であるセンチュウ類群集において貧酸素耐性を持つ細菌食者の相対頻度が増大すること、2) 夏季においても台風などにより一時的に貧酸素が解消する場合があります、時に海底下に化学合成細菌マットが形成されること、3) 環境悪化に弱い底生カイアシ類が激減する一方、クレトデス科カイアシ類など一部の分類群は生存し続けることを明らかにしてきた。

興味深いことに、大村湾貧酸素水塊下で生存した分類群は、数か月に及ぶ人工的低溶存酸素濃度下での生存、還元的堆積物中での化学合成細菌への高い餌依存が海外からも報告されてきた。

これらの結果は、海域を問わず、夏季貧酸素・還元環境下では共通の分類群が生存し、貧酸素水塊解消直後に海底へ酸素が供給されると、海底に蓄積した還元物質を基質とするダークカーボン生産と貧酸素耐性者によるダークカーボン消費の食物連鎖における重要性が一時的に増大することを示唆する。この仮説を調べるために、貧酸素の程度の異なる九州の3つの内湾(大村湾、八代海、有明海)において、安定同位体比と脂肪酸分析により海底-海洋の餌炭素源の相対的重要度の時間的変化と、そらの炭素源の食物網での広がりを定量的に評価しようとして着想した。

2. 研究の目的

海洋生物は、植物プランクトン由来の光合成有機物(ブルーカーボン)を主要炭素源とする。しかし大規模な夏季貧酸素水塊が発生する九州などの内湾海底では、夏に嫌気性微生物の無気呼吸による還元物質が蓄積、好気的底生生物が減少する一方で、貧酸素耐性を持つ細菌食性の微小生物が増加し、魚類などが貧酸素下海底に高頻度で出現すること、貧酸素下堆積物を酸素暴露すると、蓄積した還元物質を利用して光に依存しない炭素固定(ダークカーボン固定)を行う化学合成細菌の活性が上がること、秋季の貧酸素解消後、貧酸素耐性生物群が急激に減少することが分かってきた。将来、温暖化の影響で大規模化・深刻化が懸念される季節性貧酸素水塊の生態系への影響評価は極めて重要な課題であるが、貧酸素解消直後のダークカーボン固定活性化・有害な還元物質減少→貧酸素耐性生物群によるダークカーボン摂食・無機化が、貧酸素発生に起因する還元的海底環境の浄化に果たす役割に着目し、複数海域で網羅的に定量評価した研究は、当時は皆無であった。そこで本研究は、季節性貧酸素頻発海域においてダークカーボン固定食物連鎖と低酸素耐性生物群が好気的環境回復に果たす役割の定量化を目的とし、以下の材料・方法を用いて研究を遂行することを計画した。

3. 研究の方法

生物体内の脂肪酸分析により餌炭素源変動を定量化：

各生物群、特に低酸素耐性種群のブルー/ダークカーボン由来の餌炭素源との関連性と栄養段階、それらの経時変化を、微小標本も対応可能な脂肪酸分析(細菌・藻類によって特異な脂肪酸組成=餌炭素源の同定可能)と安定同位体比分析(餌炭素源と栄養段階の同定が可能)で定量化し、各内湾における海洋生物群集全体のカーボン・エナジーフローを、貧酸素水塊発生前後の様々な条件下において解明する。

複数の天然の実験場からすでに採集されたサンプルを用いて研究開始：

研究代表らがフィールドとする九州は、強度の異なる季節性貧酸素水塊が発生する3つの内湾(大村湾 >八代海 >有明海)を内包し、上記の餌炭素源の入れ替わりと食物連鎖の普遍性・地域特異性を複数の「天然の実験場」で検証可能である。本研究では、これらの内湾からすでに採集・培養されている生物標本を用いて直ちに分析開始可能な上、熊本・長崎大の調査船を用いて追加サンプル採集を行うため、短期間で成果があげられる。

4. 研究成果

(1) 大村湾における生物群集の時間変異に関しては、既存データの補強として、2017年度に本湾中央より湾奥に位置する南西部の測点で採集され、保存されていたメイオベントスサンプルの中から優占分類群であるカイアシ類群集の季節変動を調べ、同年度に採集された大村湾中央部やその他の測点の群集組成との比較を行った。

その結果、大村湾内の底生カイアシ類の群集組成は、各測点の海底直上の溶存酸素濃度の違いに強く影響されが、測点の位置に関わらず溶存酸素濃度が低下すると、貧酸素に耐性があり、化学合成細菌を消費していると考えられるクレトデス類の優占度が高くなり、貧酸素が解消されると、底生カイアシ類の中では珍しく浮遊幼生期をもち、抱卵数の多いアシナガソコミジンコなど、環境改善直後に個体数を増殖されるのに有利な形質(いわゆる r 戦略)をもつ分類群が増加す

る傾向があることを確かめた。

大村湾において、もっとも初期に研究を始めた湾中央部(水深約 20m)に設けられた測点に関しては、メイオVENTス優占分類群である底生カイアシ類群集の 2017 年から 2020 年まで 4 年間にわたる長期変動の群集構造解析を完結した。大村湾内の底生カイアシ類の群集組成は、年を問わず夏季に溶存酸素濃度が低下すると、貧酸素耐性を持ち細菌食であるクレトデス類の 1 種のみが優占度が高くなった(>90%)。また、貧酸素盛期の底生カイアシ類には死亡個体が含まれている可能性が示唆されたが、ニュートラルレッド染色による底生カイアシ類の生死判別手法により、貧酸素解消期にカイアシ類個体は全て生存していることを確認した。

(2) 本研究で新たに調査対象とした八代海・有明海の海底では、夏季の貧酸素低下後も底生カイアシ類群集においてクレトデス科の優占度の上昇が大村湾ほどは顕著ではないことも明らかになった。特に八代海中央部(水深約 18m)において 2020 年から 2022 年までの 3 年間にわたって採集された定量サンプルの解析の結果、同海域は大村湾中央部と同程度の水深にも拘わらず、夏季底層域の貧酸素化が大村湾ほど顕著ではなく、溶存酸素 3mg/L を下回することはほとんどなかった。群集組成の時間変動における季節的な周期性は弱く、底生カイアシ類群集のクレトデス科の優占率は夏季においても 40%を超えることはなかった。さらにクレトデス科の優占種も大村湾中央部とは異なり、1 種のみが極端に優占する現象もみられなかった。

(3) 新型コロナ流行の影響に加え、ウクライナにおける戦争の影響で、安定同位体比分析に不可欠なヘリウムガスが不足し、これらの微小貧酸素耐性生物の安定同位体比・脂肪酸分析の分析プロセスに関しては分析が滞った時期があった。しかし、カタクチイワシ、プランクトン群集、および懸濁粒子(GF/F フィルターで捕集される粒子)については、 $\delta^{13}\text{C}$ および $\delta^{15}\text{N}$ の値を求めた。その結果、懸濁粒子の $\delta^{13}\text{C}$ は -26 から -19 ‰、 $\delta^{15}\text{N}$ は 6 から 10 ‰となった。プランクトン群集の $\delta^{13}\text{C}$ は約 -20 ‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が約 9 ‰となった。カタクチイワシの $\delta^{13}\text{C}$ は -21 から -16 ‰、 $\delta^{15}\text{N}$ が 10 から 14 ‰となった。プランクトン群集とカタクチイワシの $\delta^{15}\text{N}$ の値を比較すると、カタクチイワシの方が約 3 から 4 ‰高くなっており、大村湾におけるカタクチイワシの餌生物はプランクトン群集であることが強く示唆された。カタクチイワシによるダークカーボン同化の可能性が示唆されなかった理由の一つとして、ダークカーボンが生産されると予想された貧酸素期の 8 月は、底層付近で植物プランクトンが多く分布していたため、底層では化学合成細菌によるダークカーボンの生産と同時期に、植物プランクトンによるブルーカーボンの生産が予想外に活発化していたと考えられる。そのため、安定同位体比の結果が貧酸素期と貧酸素期以外で大きく変化しなかったのではないかと考えられる。

またメイオVENTスの 1 標本から外部形態を損傷することなく DNA を抽出して、種分類を行うプロトコールの改良に取り組み、底生線虫類およびカイアシ類の DNA バーコーディングにおける成果を得た。

一方、化学合成細菌の分布検証の補強データとして、2015 年度の初夏から秋に 4 回に分けて本湾中央で採取された堆積物由来 DNA 試料を用いて、16S rRNA 遺伝子を対象としたアンプリコンシーケンスを実施し、微生物群集構造を明らかにした。直上水の溶存酸素濃度の変化に合わせて表層付近の群集構造が穏やかに変化するものの、一貫してダークカーボン固定を行う可能性の高いグループが堆積物中に優占している様子を確認できた。

また最終年度に大村湾内において採集された堆積物中より脂質を抽出し脂肪酸分析を行った結果、珪藻のバイオマーカーが多く含まれていた。また、硫酸還元菌のバイオマーカーもこれらに次いで多く検出された。

これらの結果は、3 つの海域中最も閉鎖性の高い大村湾海底では、通年夏季貧酸素水塊発生時に細菌食性のセンチュウ類やカイアシ類群集が優占し、貧酸素下で無気呼吸を行う硫酸還元菌細菌が海底でのカーボンフローにおいて重要な役割を果たす一方、ダークカーボン固定を行う細菌は季節を問わず存在し、海底の環境条件が変われば劇的にカーボンフローが「ブルー」から「ダーク」に回転するが、閉鎖性の低い八代海などでは、海底下の酸素濃度が貧酸素の基準を下回らず、カーボンフローの劇的な回転は局所的であることを示唆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Motohiro Shimanaga, Takumi Miyano, Minoru Wada
2. 発表標題 Severe seasonal hypoxia effects on benthic copepod communities in the Omura Bay, a highly enclosed coastal sea in Japan
3. 学会等名 International Conference on Copepoda e-ICOC-2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋永 元裕
2. 発表標題 九州閉鎖系内湾の干潟・潮下帯の生態系と水棲生物群集
3. 学会等名 日本水処理生物学会第58回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森 郁晃, 和田 実
2. 発表標題 貧酸素海域への酸素供給がもたらす堆積物表層の微生物群集組成と呼吸活性の変化
3. 学会等名 日本海洋学会 2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川上裕生, 和田 実, 丸山裕豊, 眞角 聡, 内田 淳, 青島 隆, 広瀬美由紀, 松下吉樹, 鈴木利一, 嶋永元裕
2. 発表標題 大村湾の貧酸素水塊の発達と生物応答 大村湾における底生線虫のDNAバーコーディング
3. 学会等名 日本水産学会
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	和田 実 (Wada Minoru) (70292860)	長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・教授 (17301)	
研究分担者	山田 雄一郎 (Yamada Yuichiro) (80458744)	北里大学・海洋生命科学部・講師 (32607)	
研究分担者	森 郁晃 (Mori Fumiaki) (60849537)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・特別研究員(PD) (82706)	

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
---------	---------