

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K07530

研究課題名(和文) 海洋貧酸素水塊中における食物連鎖の解明

研究課題名(英文) Understanding of marine food chain in the anoxic and dysoxic water

研究代表者

鈴木 利一 (SUZUKI, Toshikazu)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・教授

研究者番号：20284713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：海洋の貧酸素・無酸素水塊中におけるプランクトンの生態を明らかにするために、夏期に貧酸素・無酸素水塊が定期的に出現する有明海奥部および大村湾において、様々なプランクトンの現存量や分類群組成の調査を行った。貧酸素水塊が出現している海域では、植物プランクトン/ネット動物プランクトンの現存量比が大きくなっていった。また、無酸素水塊中であっても繊毛虫プランクトンは出現し、そのバイオマスは表層や中層のバイオマスに匹敵し、大型個体の割合が大きくなっていった。貧酸素・無酸素の環境が継続し、バクテリアマットが形成された海底付近では、単細胞のナノプランクトンが極めて多く出現することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：To understand marine plankton ecology under the dysoxic and anoxic conditions, standing crops and taxonomic composition of various plankton groups were investigated in Ariake Sea and Omura Bay, where dysoxic and anoxic conditions were routinely observed during summer. Abundance ratio of phytoplankton against net-zooplankton was larger in the inner part of Ariake Sea and its tendency was remarkable on July and August. Furthermore, planktonic ciliates occurred even in the anoxic water near the sea bottom and their biomass was comparable with that in the surface and middle layers, and larger-sized species occurred frequently in the anoxic water. When bacterial mat was formed on the bottom surface after prolonged anoxic/dysoxic condition, unicellular nanoplankton showed extremely higher abundance.

研究分野：浮游生物学

キーワード：食物連鎖 海洋 貧酸素水塊

1. 研究開始当初の背景

嫌気的な環境に出現する原生動物は、反芻動物のルーメン内に共生する繊毛虫が良く知られている。反芻動物の栄養吸収に関わる研究は多いものの、生態学的な視点では研究されてこなかった。最近、無酸素化した湖沼においても嫌気性の原生動物が生息することがわかり、ヨーロッパの陸水域を中心に、出現する種や現存量等が報告されている。海洋でも嫌気的な環境が出現するが、その水塊内における嫌気性原生動物の報告例は極めて少なく、生物相や食物連鎖は未知である。

水産業や環境保全の視点では「劣悪な環境」として扱われ、有害な代謝を行う嫌気性細菌が生息するとされる海洋貧酸素水塊に注目し、そこに嫌気性の原生動物が生息していることを明らかにし、新しい研究分野として広く理解されることが、本研究の主要な位置づけとなる。また、出現した嫌気性原生動物の形態や、食胞内に存在する未消化餌生物を精査することにより、分類群組成や捕食-被食の関係を同時に把握し、海洋無酸素水塊における嫌気性食物連鎖の構造を把握しようとする試みも、本研究の重要な位置づけとなる。

2. 研究の目的

貧酸素や無酸素という環境は、決して特殊なものではない。富栄養化した内湾域では、夏期によく出現する。水産業や海洋保全の観点では「死の世界」として忌み嫌われており、それ故に、生態学的な研究はおろそかになっている。死の世界と呼ばれる環境下であっても、嫌気性の細菌は数多く生息しており、より大型の嫌気性原生動物も生息している可能性がある。嫌気性原生動物がそこに生息しているならば、「食う-食われる」の関係、すなわち、食物連鎖の存在も予想される。本研究では、有明海および大村湾の貧酸素・無酸素水塊中において嫌気性原生動物の存在を確認し、その生物相・現存量・捕食-被食等の生態学的な関係を調べて食物連鎖の構造を推測することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 有明海における動植物プランクトン

長崎三重港沖から有明海奥部に至る5測点において、2015年の5月から11月にかけて長崎大学練習船鶴洋丸より5回の調査を行った。珪藻および渦鞭毛藻については、バケツで表層水を、中層・底層の海水をロゼット採水器により採集し、直ちに酢酸ルゴール液にて固定した。珪質鞭毛藻については、バケツ(表層)とロゼット採水器(中層・底層)により採集した海水10Lを20 μ m目合のネットに通して濾過濃縮し、中性ホルマリンで固定した。ネット動物プランクトンについては、335 μ m目合のノルパックネットを用いて、鉛直曳(海底直上から表層まで)と表層水平曳を行い、得られた試料を直ちに中性ホルマリ

ンで固定した。

珪藻・渦鞭毛藻・珪質鞭毛藻については、枠付きスライドグラスに固定試料を入れ、倒立顕微鏡を用いて200~600倍で観察し、分類・計数を行った。ネット動物プランクトンについては、シャーレに固定試料を入れ、実体顕微鏡を用いて10~100倍で観察し、分類・計数・個体サイズ測定を行った。

(2) 大村湾における繊毛虫プランクトン

2016年4月~10月にかけて、長崎大学練習船鶴洋丸より大村湾中央部の表層水・中層水・深層水・海底直上水の採水を行った。表層水をバケツで、表層以外の層をCTD-RMSで、海底直上水はアシュラ採泥器で採水した。採水後ただちに、酢酸ルゴール液で試水を固定した。

固定した試料を沈殿濃縮し、検鏡の直前にチオ硫酸ナトリウムを添加して脱色した。試料を枠付きスライドグラスに入れ、カバーグラスをかけた。微分干渉装置を取り付けた倒立顕微鏡を用い、20~60倍の対物レンズで観察を行った。観察した繊毛虫の細胞の内外の構造から、分類・同定を可能な限り行った。

(3) 大村湾における微細プランクトン

大村湾中央部において、2017年4月~10月に採集を行った。長崎大学練習船鶴洋丸より、表層と中層、海底直上の3層で採水した。船上から、表層水を採水バケツで、中層水をCTD-RMSで、海底直上水を鶴洋丸備え付けの海底直上採水器で、それぞれ10L以上を採水した。

試水100mLをポリ瓶に移した後、直ちに酢酸ルゴール溶液で固定した。また、残りの試水10Lを、20 μ m目合のプランクトンネットで濾過濃縮し、100mLのポリ瓶に移した後、直ちに中性ホルマリンで固定した。

なお、プランクトンネットで濾過濃縮し中性ホルマリンで固定する処理の過程で、細胞膜がむき出しな単細胞プランクトンの多くは破損あるいは破損後に消失するので、無殻の繊毛虫やギムノディニウム目に属する渦鞭毛藻等に関しては、現存量を過小評価してしまう恐れが多分にある。

4. 研究成果

(1) 有明海における動植物プランクトン

長崎三重港沖から有明海に至る測点における珪藻プランクトンの出現量は、表層で $9.0E+03 \sim 6.3E+06$ cells/L、水柱中積算平均で $5.0E+03 \sim 5.7E+06$ cells/Lとなった。五島灘から有明海に向かうにつれて多くなる傾向がみられ、特に夏期に顕著であった。渦鞭毛藻の出現量は珪藻よりも少ない場合が多く、表層で $2.0E+03 \sim 2.6E+05$ cells/L、水柱中積算平均で $1.7E+04 \sim 1.0E+05$ cells/Lであった。5・7月は有明海に向かうにつれてやや多くなるものの、他の調査時にはそのような傾向は見られなかった。珪質鞭毛藻の出現

量は渦鞭毛藻よりもさらに少ない傾向があり、表層で $2.5E+01 \sim 7.3E+04$ cells/L、水柱中積算平均で $3.6E+01 \sim 5.6E+04$ cells/L であった。11月の調査時を除き、有明海に向かうにつれて多くなる傾向が見られた。

ネット動物プランクトンの出現量は、表層で $2.5E+01 \sim 7.3E+04$ indiv./ m^3 、水柱中平均で $3.6E+01 \sim 5.6E+04$ indiv./ m^3 となっていた。五島灘から有明海に向かうにつれて出現量が少なくなる傾向が見られた。ネット動物プランクトンの平均個体サイズは、球換算直径で $350 \sim 1100 \mu m$ であり、7月の調査時を除くと有明海に向かうにつれてサイズが小さくなる傾向が見られた。

五島灘から有明海に向かうにつれて、植物プランクトンとして優占する珪藻の出現量は多く、貧酸素が出現する夏期に顕著となっていた(図1)。しかし、ネット動物プランクトンは少なくなり、また、その個体サイズは小さくなる傾向が見られた。有明海は基礎生産者が豊富に存在する割に、動物プランクトン量の少ない状態が頻繁にあり、基礎生産者から上位栄養階層への水柱中における転送の効率は、五島灘海域よりも低くなっている可能性が考えられた。

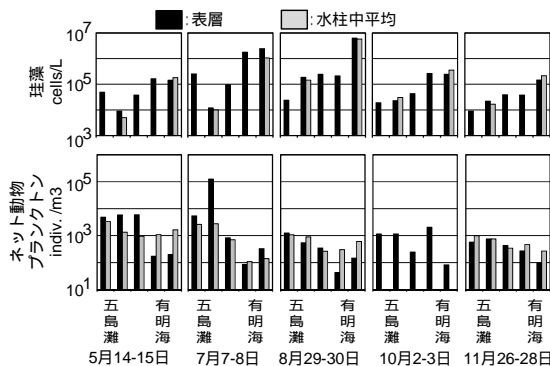


図1. 五島灘から有明海に至る5測点での、珪藻およびネット動物プランクトンの出現個体数。測点は、左から三重港沖、高島沖、橘湾、島原沖、有明海奥部の順。

(2) 大村湾における繊毛虫プランクトン出現個体数密度

大村湾の海底直上水における繊毛虫プランクトンの出現個体数密度は、表・中層の個体数密度よりも少ない傾向を示した(図2)。大村湾の海底直上には、水柱中を沈降してきた粒状有機物が多量に堆積し、その有機物を起源とするような微細な生物(繊毛虫プランクトンの餌となるような生物)が豊富に存在して、繊毛虫が大量に出現するという生物過程が予想されたが、実際はそうではなかった。

大村湾の海底直上水は、9月を除いて貧酸素化が進んでおり、特に、8月は貧酸素化がピークであった。このような環境下においても、繊毛虫プランクトンは、表層や中層よりやや少ない個体数密度で出現していた。大村湾の貧酸素・無酸素水塊では、嫌気性のバク

テリアが出現することが報告されているが、真核生物に属する繊毛虫プランクトンも、ある程度(海底直上の個体数は表層の個体数よりも少ないが、海底直上では大型の個体が優占するので、バイオマスはむしろ多いはずである)出現することが本研究で初めて明らかとなった。これらの微生物にとっては、大村湾の貧酸素・無酸素水塊は決して死の世界ではなく、微生物間の「食う・食われる」が存在し、そうした食物連鎖を通じた物質の転送・循環がおこなわれている活動的な環境であると考えられる。

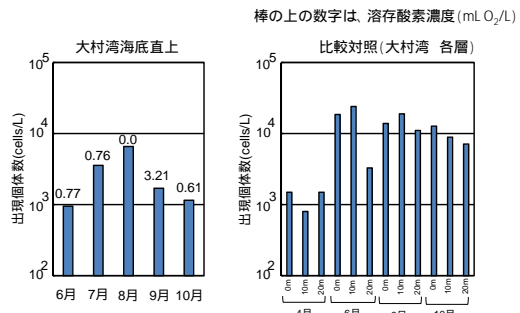


図2. 繊毛虫プランクトンの出現個体数密度。左: 大村湾海底直上水中、右: 大村湾水柱中。

分類群組成

繊毛虫の分類群組成に、海底直上と表層で違いが見られる時があり(図3)特に、貧酸素化のピークであった8月に違いが顕著であった。8月の海底直上で大きな組成割合を示したOligotrichida目以外の繊毛虫には、貧酸素化した環境に適応したものが存在すると考えられる。今後は、その様な繊毛虫の形態を、鍍銀染色などで詳細に調べ、分類に関する情報を蓄積していく必要があると思われる。また、8月には溶存酸素濃度が、CTDセンサーで検出限界以下となるほど低くなっていた。完全な無酸素状態においても繊毛虫が出現しており、このような種は、通常の酸素呼吸ではなく、解糖系だけでエネルギーを獲得できるような特殊な能力を有している可能性が考えられる。

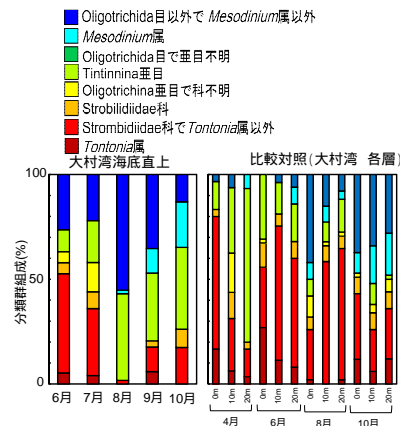


図3. 繊毛虫プランクトンの分類群組成。左: 大村湾海底直上水中、右: 大村湾水柱中。

個体サイズ組成

超大型の繊毛虫は、海底直上の貧酸素化が顕著であると考えられる8月と、その前月の7月に多く見られた(図4)。このような大型の繊毛虫は、貧酸素化した環境に適応していると考えられる。一般に、細胞の容積に対する表面積の比が大きい時に、すなわち、個体サイズが小型になればなるほど、酸素の消費に対する酸素の取り込み能力が大きく、貧酸素環境でも酸素呼吸をする上で都合が良いことが考えられる。しかしながら、大村湾の貧酸素水塊においては、小さな個体の割合は少なく、大型個体が多くなっていた。このような大型個体は、酸素呼吸を行っているのではなく、前述のように、特殊な代謝でエネルギーを獲得している可能性が考えられる。

また、Strombidiidae 科の超大型の個体では、細胞内に珪藻の被殻が観察された。繊毛虫は小型の原生生物を専ら捕食していると考えられているが、超大型の繊毛虫は必ずしもそうではなく、珪藻プランクトンや付着珪藻を摂餌する場合があると考えられる。

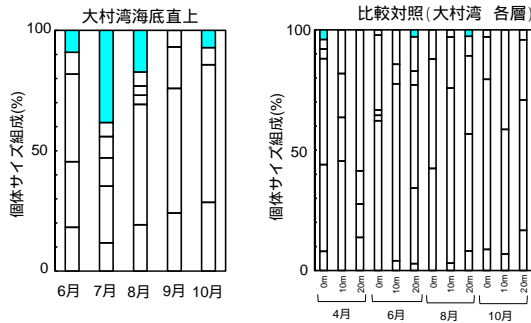


図4. 球換算直径が $60\mu\text{m}$ 以上の繊毛虫プランクトンの組成割合(水色の部分)。左: 大村湾海底直上水中、右: 大村湾水柱中。

(3) 大村湾における微細プランクトン出現個体数密度

大村湾中央部におけるプランクトンの出現個体数密度は、球換算直径が $4\sim 10\mu\text{m}$ で $7.6\text{E}+05 \sim 5.1\text{E}+07$ cells/L、球換算直径が $10\mu\text{m}$ 以上で $1.0\text{E}+05 \sim 9.5\text{E}+06$ cells/L、球換算直径が $20\mu\text{m}$ 以上で $1.2\text{E}+03 \sim 2.1\text{E}+05$ indivs./L であった。個体のサイズが $4\sim 10\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 以上、 $20\mu\text{m}$ 以上と段階を追うごとに、個体数密度が一桁ずつ小さくなった。

8月21日の海底直上では例外的な挙動を示しており、球換算直径が $4\sim 10\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ 以上の画分では、出現個体数密度は他の調査時よりも非常に大きく、一方、 $20\mu\text{m}$ 以上の画分では、他の調査時よりも出現個体数密度は非常に小さくなっていた(図5)。この時、海底直上では、嫌気的な環境が進んでおり、濃密なバクテリアのマットが形成されていたことが、水中ビデオカメラの観察で確認されている。このバクテリアを餌として利用できる原生動物プランクトンや、このバクテリアの代謝産物により恩恵を受ける植物プランクトン等が、小型の画分には多く存在している、貧酸素環境下にも関わらず現存量を増

加させていた可能性が考えられる。ただし、 $20\mu\text{m}$ 以上の画分では、現存量が極めて少ないことから、大型のプランクトンに対しては恩恵が少なく、貧酸素によるダメージの影響が強かったのかもしれない。なお、溶存酸素濃度と出現個体数密度との関係は、いずれのサイズ画分でも顕著ではなかった。

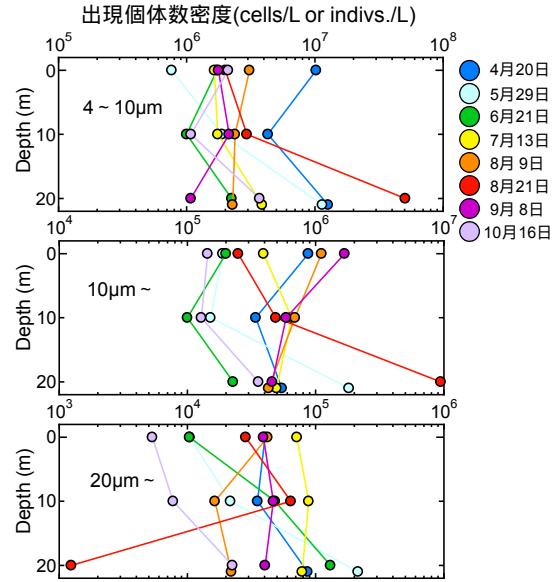


図5. 大村湾における微細プランクトンの出現個体数密度

分類群組成

珪藻は貧酸素環境下でも多く出現していた。ただし、弱って代謝が低下した個体を計数した恐れはある。本研究においては、珪藻の代謝活性については把握できなかったが、生存している(少なくとも、死んではいない)珪藻プランクトンが、貧酸素環境下に多く出現したのは大きな発見である。遊泳能力を持たない珪藻が、貧酸素環境下で、どのように生き残っていたのか、あるいは、どのように生き残っていくのかについては、今後の大きな課題であると思われる。

7月~9月の海底付近では貧酸素環境となっていたが、球換算直径が $20\mu\text{m}$ 以上の画分においては、渦鞭毛藻・珪質鞭毛藻・カイアシ類等の移動能力のあるプランクトンが出現し、これらのプランクトンの出現割合は、7月には47%、8月9日には29%、8月21日には20%、9月8日には23%であった。また、貧酸素時の海底直上における出現個体数密度(総出現量)は、8月21日の1回を除き、表層・中層と比べて、それほど少なくはなかった。一般的な遊泳速度は、カイアシ類では1日に17~170m、渦鞭毛藻では1日に17mと報告されている。このような速度で移動できる能力があるにもかかわらず、貧酸素環境である海底直上に、数多くの個体が生息していたことになる。これらのプランクトンは、もしかすると、貧酸素の影響を受けない種であるのかもしれない。ただし、種のランクでは、分類・同定を行うことができず、本

研究ではその詳細についてまでは分からなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1件)

Umezawa Y, Tamaki A, Suzuki T, Takeuchi S, Yoshimizu C, Tayasu I, Phytoplankton as a principal diet for callinassid shrimp larvae in coastal waters, estimated from laboratory rearing and stable isotope analysis, Marine Ecology Progress Series, 査読有、592巻、2018、141 - 158
DOI: 10.3354/meps12507

〔学会発表〕(計 5件)

末次淳一、中脇陽光、鈴木利一、長崎周辺海域に出現するカイアシ類ノープリウス幼生の遊泳行動、日本海洋学会 2017 年度秋季大会、2017 年

Rei Somiya, Toshikazu Suzuki, Akio Tamaki, Motion of appendages during swimming and feeding in zoeae of the ghost shrimp, *Nihonotrypaea harmandi*, The Third Asian Marine Biology Symposium, 2017 年

宗宮麗・鈴木利一・玉置昭夫、ハルマンズナモグリゾエア幼生の遊泳と摂餌に関わる各付属肢の動き、2017 年日本プランクトン学会・ベントス学会合同大会、2017 年

Minoru Wada, Ryuji Kondo, Yu Umezawa, Motohiro Shimanaga, Dongsung Kim, Toshikazu Suzuki, Yuuki Kawabata, Yoshiki Matsushita, Atsushi Ishimatsu, Takashi Aoshima, Hiroyuki Takasu, Takuro Nakahara, Masao Amano, Feel good in hypozia? - From microbes to whales, diverse life forms subsist on the "dead zone" in an enclosed bay (Omura Bay, Nagasaki) -, The JSFS 85th Anniversary-Commemorative International Symposium "Fisheries Studies for Future Generations", 2017 年

荒川佑一、大貫友祥、金原好美、鈴木利一、五島灘から有明海における動植物プランクトンの出現状況、日本海洋学会 2016 年度秋季大会、2016 年

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木利一 (SUZUKI, Toshikazu)
長崎大学・水産・環境科学総合研究科(水産)・教授
研究者番号: 20284713

(4)研究協力者

荒川 佑一 (ARAKAWA, Yuichi)
益富 ゆか (EKITOMI, Yuka)
大貫 友祥 (ONUKI, Tomoyoshi)
小倉 一真 (OGURA, Kazuma)
金原 好美 (KANAHARA, Konomi)
川辺 えみり (KAWABE, Emiri)
小林 正陽 (KOBAYASHI, Masaakira)
末次 淳一 (SUETSUGI, Junichi)
竹下 太基 (TAKESHITA, Hiroki)
中脇 陽光 (NAKAWAKI, Yoko)
守谷 太介 (MORIYA, Daisuke)