

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21340153

研究課題名（和文）閉鎖系海域に出現する貧酸素水塊が低次生態系に与える影響

研究課題名（英文）Phytoplankton changes effected by anxious water of enclosed

研究代表者

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・教授

松岡 敷充（MATSUOKA KAZUMI）

研究者番号：00047416

研究成果の概要（和文）：

植物プランクトンは生態系の基盤をなし、その趨勢は水温、塩分、光エネルギーの他、栄養塩の支配を受ける。現在の沿岸域で優占する植物プランクトンは珪藻類、渦鞭毛藻類、ラフィド藻類などであるが、それらのどのグループが優勢となるかについては十分に理解されていない。本研究では貧酸素水塊が定期的に発達する閉鎖系海域の西九州・大村湾を調査海域とし、貧酸素水塊の発達に伴って底質からの選択的 PO_4 溶出現象に注目し、それが植物プランクトン群集に与える変化を現場観測とメソコスム実験を用いて明らかにし、更に柱状堆積物に残された渦鞭毛藻シスト群集の変化から海水中の栄養塩変化を推察した。その結果、現場では1) 夏季の貧酸素水塊は大村湾固有水と外洋水が湾口で混合した高密度水が中層に貫入して躍層が形成され、2) 海水—堆積物境界域でバクテリアの有機物分解活動により貧酸素水塊が形成される。3) 高水温期の貧酸素環境では堆積物から NH_4^+ や PO_4^{3-} がより多く溶出する、ことが明らかになった。メソコスム実験では人為的に貧酸素環境を再現し、底質からの栄養塩溶出と植物プランクトン群集変化を調査した結果、4) 貧酸素環境下では NH_4^+ や PO_4^{3-} が溶出し、また優占プランクトンが珪藻から渦鞭毛藻に変化したことが明らかになった。5) 柱状堆積物中の渦鞭毛藻シスト群集は従属栄養性種の増加が示すところの1970年後半以降に富栄養化が進行したことが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

In order to understand a relation between phytoplankton floral change and nutrient supply, investigations of formation of anoxic environments, mechanisms of nutrient supply, and distribution of nutrients were carried out in Omura Bay, West Kyushu, Japan. Results were follows: intrusion of dense seawater forms stratification at the center basin, and then anoxic water is produced by microbial respiration. Under anoxic environments, NH_4 and PO_4 are selectively dissolved from organic-enriched bottom sediments. In a mesocosm experiment where we produced an anoxic condition artificially, a floral change from diatoms to dinoflagellates occurred after selective regeneration of NH_4^+ and PO_4^{3-} . Historical change of dinoflagellate cysts recorded in core sediment of Omura Bay suggests that eutrophication reflected by increase of heterotrophic dinoflagellate cysts appeared around 1970s.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	12,900,000	3,870,000	16,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：層位・古生物学

キーワード：貧酸素水塊、栄養塩溶出、植物プランクトン、大村湾、メソコスム

1. 研究開始当初の背景

生態系における低次生産システムとは植物プランクトンを基礎生産者とし、次いでそれを捕食する第一次消費者との係わりである。新生代以降の沿岸海域での基礎生産者はおもに珪藻と独立栄養性渦鞭毛藻やラフィド藻である。これらの植物プランクトンの動態は主に水温、塩分、栄養塩などの環境要因と従属栄養性渦鞭毛藻や繊毛虫、カイアシ類など消費者の捕食圧によって制御されている。化石の産出記録は逆にこれらの環境要因の考察に繋がるが、従前の調査研究では個々の分類群による環境推定があるものの、システム(生態系)としての理解に乏しかった。基礎生産者の交代(システム進化)がどうして生じたのかを理解するためには、化石として記録に残るまでの海洋における物理過程、化学過程、生物過程を把握することが重要である。沿岸域には成因が異なる閉鎖系海域が多く、このような海域では貧酸素水塊の発達とともに海底堆積物から栄養塩が溶出することが明らかになりつつあり、窒素やリン、珪素などの主要栄養塩を主とする水質変化が水温や塩分とともに植物プランクトンの動態に多大の影響を与えていると考えられる。健全な低次生産システムは食物連鎖網を通して高次消費者を支えており、結果として食糧資源供給に繋がる。近年の沿岸水域での富栄養化に伴う環境劣化は赤潮や青潮の頻発に見られるように低次生産システムに重大な影響を及ぼしている。その一方で、基礎生産者の動態変化は健全な食物連鎖網を遮断することにより環境にも影響を及ぼす。このような視点での研究展開は現在生起している現象の直接的理解であるが、これらを過去に生起した現象、とりわけ貧酸素水塊の発達とそれが基礎生産システムに与えた影響一珪藻ワールドから鞭毛藻ワールド一理解のためのモダンアナログであるとの視点にも繋がる。本研究では貧酸素水塊がほぼ毎年発生する西九州大村湾を現場し、貧酸素水塊の発生と低次生産系との関係を把握し、地質学的過去の基礎生産者交代(システム進化)理解につなげる。

2. 研究の目的

解明すべき主課題は「過去に発生した貧(無)酸素水塊の発達が栄養塩濃度や組成変化を通して優占する基礎生産者の交代に影響を与えた」との仮説に留意し、実際にそのような環境がほぼ毎年出現する大村湾を現場海域として活用し、そこでの栄養塩濃度や組成変化が低次生態系に与える影響すなわち基礎生産者である植物プランクトン群集(主として珪藻や独立栄養性渦鞭毛藻類)変化を評価することである。大村湾では水質変化に関わる要因として、1)湾の自然特性である極めて閉鎖性が強いことにより夏季の成層構造の発達とそれによる底質からの栄養塩溶出、2)陸域からの栄養塩供給がある。1)に関しては堆積物の細粒化による有機物含有量の増加し、貧酸素環境下ではより多量の栄養塩溶出が、2)に関しては流域人口の増加や社会構造の変化に伴う陸域からの栄養塩付加、が想定できる。古生物学的には実際に生起している事象から2)の影響を取り除き、1)の事象を明らかにすることである。そのために、過去50年にわたり集積されてきた大村湾の水質・底質に関する既存文字記録データを整理するとともに、柱状コア試料等に保存された微化石群集の解析を進める。このような観点から、現在の事象をモダンアナログとして捉えることは極めて重要である。本研究はその取り組みとして、海洋構造に関連した貧酸素水塊出現(物理過程)、それによる底質からの栄養塩溶出(化学過程)、それらが基礎生産者である植物プランクトン群集変化に与える影響(生物過程)を現場での実態把握とともに海水中の栄養塩濃度や組成を変化させるメソコスム実験を通して植物プランクトン群集変化の把握し、その結果を地質学的手法一柱状試料に残された記録・観測記録の解読一を根幹に据えて時系列的に考察し、閉鎖

系海域での栄養塩濃度と組成変化が基礎生産に与える影響のモデルを構築する。

3. 研究の方法

海洋構造に関連した貧酸素水塊出現、それによる底質からの栄養塩溶出、それらが基礎生産者である植物プランクトン群集変化に与える影響、柱状試料に残された記録と既存資料の整理・解読、閉鎖系海域での栄養塩濃度と組成変化が基礎生産に与える影響を考察する。

1. 既存記録の収集と整理;過去の観測記録の収集と整理。
2. 貧酸素水塊発生メカニズムの解明;貧酸素水塊が発生する水塊構造把握を目的とした海洋観測の実施。
3. 水質と植物プランクトン組成の連続観察
4. 底質からの栄養塩溶出実態の解明
5. メソコスム実験による植物プランクトン群集変化解明
6. 柱状試料中の渦鞭毛藻シスト群集分析と栄養塩動態との関連解明。

4. 研究成果

1) 貧酸素水塊形成メカニズム

大村湾底層の貧酸素水塊は湾中央部底層の残差流の変化とよく対応している。残差流の内訳において風に起因する成分の寄与は小さく、その変化の主な要因は密度流による。さらに、湾内の密度流の変化は、湾口部の水温低下と同時期に起こっていることから、湾外からの低温・高塩分水(高密度水)の流入によって湾口部の密度が増加し、それが湾内中層に貫入する事で惹起される。また、高密度水は湾内の密度流による鉛直循環を強化した可能性がある。密度流による底層流入は貧酸素水塊を湾奥部に移動させるだけで、貧酸素水塊の消滅は海面冷却による鉛直対流による。

2) メソコスム実験による底質からの栄養塩溶出とそれが植物プランクトンに与える影響

本研究ではメソコスム(閉鎖実験生態系)を用い、夏季の成層期に貧酸素化に伴う栄養塩の溶出の実態とそれが一次生産者である植物プランクトン群集組成に与える影響を調査することを目的とした。メソコスムは形上湾の南方、沖合15m、水深4mの位置(北緯 32° 54.448'、東経129° 47.011')に設置した。メソコスムは直径1m、長さ6mの円筒状の透明ビニールバッグで上端、下端ともに蓋を付けず、上端は大気に開放し、下端は底質表層に貫入させ、外水域と遮断した。メソコスム上端にはブイを取り付け、メソコスム内海水を外水から隔離した(図1)。実験には4機のメソコスムを用い対照区とし



図1 メソコスム設置状況(上)と2つの異なるプラスチックバッグ。右下;下から2/3を遮光シートで覆っている。

て近傍の外水を用いた。それぞれのメソコスムに異なった装置で異なった環境を得ることが出来るように設定した。①透明ビニールバッグ、②透明ビニールバッグの下から2/3を黒の遮光シートで覆ったもの、計2基を用いた。(図2)

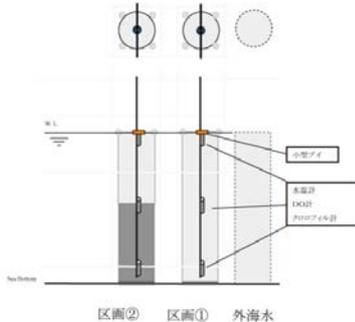


図2 メソコスム実験仕様

・環境項目の測定

水温、塩分、溶存酸素(以下DO)、クロロフィルa量、および光子量の計測にはAAQ多項目水質計を用い、実験期間をとおして毎日10時に測定した。

・採水方法と深度

採水時にはシリコンチューブ(内径8mm、外径11.2mm)を所定の層まで垂下し、ローラーポンプを用いた。表層、中層(2m)、底質表層(B-5cm)で、一日毎に採取した。また、底質表層上5cmから栄養塩分析用試水を採取した。

・植物プランクトン同定・計数方法

無殻鞭毛藻類の観察・計数のために試料を固定せず、試料1mLを3回計数し、その平均と標準偏差をもとめた。

・栄養塩分析

亜硝酸態窒素(NO₂-N)、硝酸態窒素(NO₃-N)、アンモニア態窒素(NH₄-N)、及びリン酸態リン(PO₄-P)の4項目について測定し、それからDIN及びDIPを算出した。

・植物プランクトンの出現種とその動態

実験期間中にメソコスム試料では、渦鞭毛藻 20 属 39種、珪藻 25属38種、ディクチオカ藻1属1種、ラフィド藻2属2種、その他の植物プランクトン2属2種、合計50属82種の出現を確認した。また、メソコスム外の海水試料では、渦鞭毛藻15 属 28種、珪藻 26属40種、ディクチオカ藻1属1種、ラフィド藻2属2種、その他の植物プランクトン2属2種、合計46属73種の出現を確認した

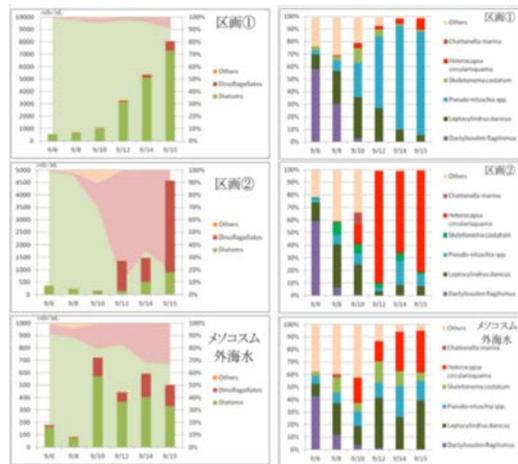


図3 植物プランクトン群集変化(左細胞数, 右群集組成)。

・植物プランクトン群集の変化(図3)

実験初日はどの区画においても珪藻類が植物プランクト

ン群集の90%以上を占め、中でも*Dactyliosolen flagilismus*が全体の約43~59%で最も優占していた。その後、実験区ごとに群集組成の違いが生じた。実験区①では珪藻類の細胞密度の顕著な増加みられ、実験終了日まで継続して90%以上を占めていた。また、実験区②では9月10日から渦鞭毛藻類が顕著に増加し、実験終了日には全植物プランクトンの約80%を占めていた。実験区外水では珪藻類、渦鞭毛藻類共に増加しており、実験終了日には珪藻類が約65%、渦鞭毛藻類が約35%を占めていた。

・環境項目(栄養塩のみを記述する;図4)

区画①では、DINは、表層0.127~1.020 μmol/L、中層0.074~0.521 μmol/L、底層0.152~1.175 μmol/Lの範囲であり、DIPは、表層0.022~0.154 μmol/L、中層0.022~0.346 μmol/L、底層0.010~0.346 μmol/Lの範囲であった。実験期間中に、各層で栄養塩の顕著な増加はなかった。区画②では、DINは、表層0.081~1.841 μmol/L、中層0.198~1.817 μmol/L、底層1.430~13.633μmol/Lの範囲であり、DIPは、表層0.010~0.082μmol/L、中層0.118~0.310μmol/L、底層0.346~1.113 μmol/Lの範囲であった。DINは14日の底層で最も高く、

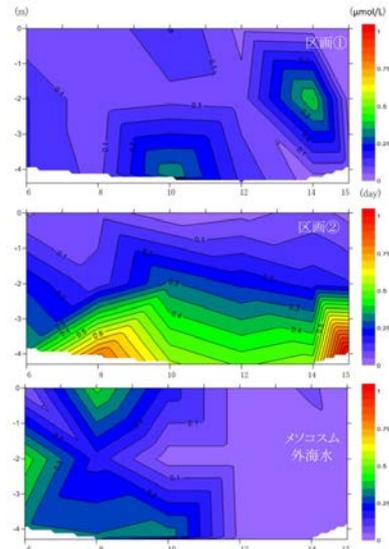


図4 DIP量の変化

DIPは8日から実験終了日まで底層で高い値を示した(図4)。DINが高い値を示した日はNH₄-Nが顕著に高くなっていた(13.584 μmol/L)。メソコスム外海水では、DINは、表層0.222~18.970 μmol/L、中層0.108~3.566 μmol/L、底質表層0.121~1.101 μmol/Lの範囲であり、DIPは、表層0.022~0.418 μmol/L、中層0.022~0.430 μmol/L、底質表層0.034~0.334 μmol/Lの範囲であった。DINは実験開始日から10日まで高い値を示し、DIN、DIP共に時間経過とともに減少していた。DINが高い値を示した8日はNO₃-Nが顕著に高くなっていた。

・貧酸素水塊形成と栄養塩

貧酸素水塊が形成された区画②で実験開始後3日目(8日)に底層の酸素飽和度は76%から15%(5.02から1.71 mg/L)に低下し、4日後(9日)にほぼ無酸素状態になった。栄養塩類の中でリン酸は底層の酸素飽和度15%(DO 1.71 mg/L)以下になった8日以降に溶出した。NH₄-N濃度は14、15日に増加したが、これは細菌による沈降した珪藻類などの有機物分解に起因すると考えられる。また、メソコスム外海水で3日目(8日)にNO₂-N、NO₃-N濃度が増加した(6.53~18.90 μmol/L)原因は、実験開始の9月4日の降雨がより、調査地点近傍の河川から陸域起源の栄養塩供給であると思われる。

・植物プランクトン群集変化と種構成の変化

海水攪拌の弱い環境では*D. flagilismus* や*Leptocylindrus danicus* のような大型の珪藻は沈降する。今回のメソコスム実

験結果では、区画①のように光が十分ある場合 ($57.494 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$) は弱攪拌環境に適した *Pseudo-nitzschia* spp. のような小型群体性珪藻が増殖・優占し、区画②のように底層に光合成には不十分な微弱光しかない場合 ($4.296 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$) には、沈降した珪藻類は死滅し、その有機物を細菌が分解したことにより貧酸素水塊の形成が促進されたと推察できる。さらに、貧酸素化が継続したことから栄養塩、特にリン酸が底質から溶出した結果、珪藻が生育しない水域で垂直移動能を備えた *H. circularisquama* が栄養塩を優先的に活用し得たことにより優占したと考えられる。大村湾に出現する *H. circularisquama* は最大増殖速度が 30°C 、塩分 $20 \sim 30$ で、広温性・広塩性であること(山砥 2005)、最小細胞内窒素・リン含有量が他の植物プランクトンよりも比較的小さいことが知られている(佐藤 2005)。実験期間の水温 ($25.14 \sim 29.76^\circ\text{C}$)、塩分 ($26.11 \sim 30.56$) は *H. circularisquama* の至適増殖域であり、さらに増殖に必要な栄養塩要求量が他の植物プランクトンよりも小さいという生理特性が、区画②において他の鞭毛藻類よりも *H. circularisquama* がいち早く増殖し、優占した要因の一つであると考えられる。

今回のメソコスム実験では海水の成層構造の発達に珪藻類の増殖を抑え、加えて貧酸素環境下で、リン酸を主とした栄養塩が特異的に溶出した。すなわち DIN/DIP が低下したことにより、鞭毛藻類 *H. circularisquama* が優占したことが明確に示された。梅澤・牟田(本成果報告書)は夏季の高水温と貧酸素水塊の発達により、底質から NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ の溶出が促進され、DIN/DIP の低い底層海水が形成され、それが鉛直混合によって有光層にまで運ばれ、植物プランクトンの増殖に寄与する可能性を指摘している。長期的には大村湾中央部で夏季から初秋に掛けて広範囲に貧酸素水塊が発達し、それに呼応して夏季に DIN/DIP の上昇、初秋に DIN/DIP の低下傾向があり、その時期に渦鞭毛藻が高密度で出現する事が知られている(草原 2009)。

3) 大村湾堆積物から栄養塩溶出ポテンシャルの時空間変動

大村湾の赤潮の発生や夏季の貧酸素水塊の形成には、湾内への過剰な栄養塩や有機物の負荷が要因の1つであると考えられ、特に湾中央部では堆積物からの栄養塩溶出の寄与が報告されているが、その時空間的変動については不明点が多い。本研究では大村湾の堆積物からの栄養塩溶出ポテンシャルを時空間的に明らかにすることを目的とした。栄養塩溶出は堆積物表層の有機物特性により変化があると予想されるため、まず、堆積物表層の有機物の化学成分(C, N, P, Si 含量等)の空間分布を明らかにした(図 5, 6)。続いて、有機物特性が異なる地点間で、季節的に変動する水温や溶存酸素濃度の違いに応じた各種栄養塩の溶出特性を、培養溶出実験と現場の濃度勾配に基づく拡散法で比較し明らかにした。大村湾の堆積物表層では有機炭素(C)量が $1.4 \sim 3.0\%$ 、有機窒素(N)量が $0.17 \sim 0.35\%$ で均一ではなく、特に湾中央部に多く分布していたが、全リン(TP)量は湾内で比較的一定であり、また、生物シリカ(BSi)量は、湾の北東から南部にかけて高い濃度がみられた(図 6)。算出した栄養塩フラックスは手法による差が見られたが、傾向としては、水温が高く嫌気状態の時にアンモニアやリン酸が多く溶出し、ケイ素の溶出は水温の高い時に多くみられた。硝酸は、水柱と還元的な堆積物中との濃度差が明瞭でないことが多く、溶出量が環境条件の違いによる差は見られなかった。これらの結果を用い、堆積物の間隙水中の各種栄養塩濃度が、堆積物表層の N, TP, BSi 量と水温の関数によって近似できることを重回帰分析から明らかにすることができた。これにより、貧酸素水塊が発達し、水温が高まる夏季には、湾中央部からの栄養塩溶出ポテンシャルが高まり、湾内の植物プランクトンの種組成変化にも影響を与えることが示唆された。

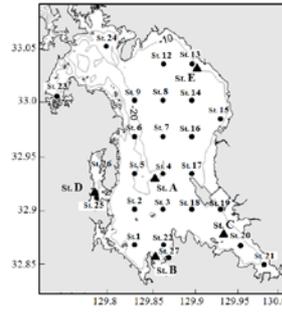


図 5 大村湾における堆積物採取地点

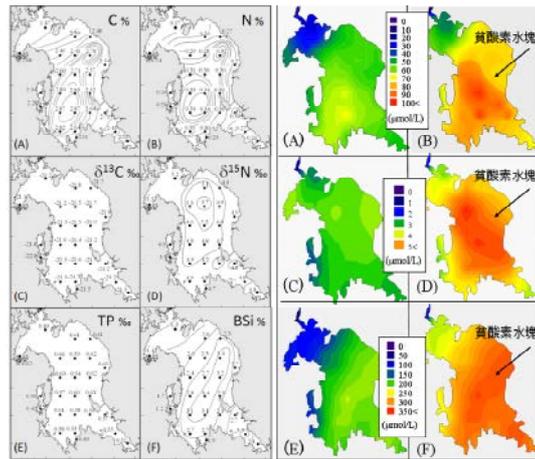


図 6 右) 表層堆積物中の A)炭素含量、B)窒素含量、C) $\delta^{13}\text{C}$ D) $\delta^{15}\text{N}$ 、E) 全リン含量、F) 生物シリカ含量
左) 表層堆積物中の間隙水中の栄養塩濃度の見積もり
A) 7 月期 NH_4^+ 、B) 9 月期 NH_4^+ 、C) 7 月期 PO_4^{3-} 、D) 9 月期 PO_4^{3-} 、E) 7 月期 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 、F) 9 月期 $\text{Si}(\text{OH})_4$

海域	条件	DIN	NH_4^+	DIP	DSi	算出方法	文献
播磨灘	23°C ・好気	1.8	-	-0.5	130	コア培養法	神山他, 1997
大蔵砂	好気	20.0	2.0	1.0	100	拡散法計算	松原, 1996
大村湾	8月	500	140	-	-	拡散法計算	野上, 2006
大村湾	夏・好気	-8.17 - 22.5	1.41 - 22.2	-4.8 - 6.6	258.1 - 269.7	コア培養法	(本研究)
	夏・嫌気	24.3 - 269.1	24.9 - 269	3.3 - 35.5	128 - 297.9		
	冬・好気	-12 - 1.0	-4.2 - 1.5	-1.4 - 1.0	27.4 - 55.6		
	冬・嫌気	4.6 - 8.5	7.5 - 8.7	0.6 - 18.6	31.8 - 75.0		
大村湾	30°C	7.2 - 78.9	8.0 - 81.9	0.6 - 3.5	52.8 - 606.7	拡散法計算	(本研究)
	10°C	5.3 - 47.7	5.8 - 49.7	0.4 - 2.2	32 - 368		

・堆積物から溶出する栄養塩が大村湾の植物プランクトン組成に与える影響について

大村湾においては、長期的な観測データの解析結果から、溶存酸素濃度が長期的に低下傾向にあり、溶存酸素濃度 60% 以下の低酸素水の分布範囲が広がっていること、また、溶存酸素濃度の低下が見られる夏季には大村湾の平均的な DIN/DIP が低下し、秋季には DIN/DIP が上昇する傾向があると報告されている(草原 2009)。また、栄養塩環境と植物プランクトン種の出現についても、珪藻類は高い DIN/DIP 時に、渦鞭毛藻類は低い DIN/DIP 時に高密度に出現することも示唆されている(草原, 2009)。本研究の結果より、特に夏季の高水温と貧酸素水塊と関連して、底層堆積物から NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ の溶出が盛んになり、DIN/DIP の低い底層海水が形成されることがわかっており、この水塊がエスチュアリー循環の強化や、台風等による鉛直混合によって表層の有光層に運ばれると、植物プランクトンの組成にも大きく影響を与えることが考えられる。

4) 大村湾貧酸素水状態で微生物群集の代謝と構造

堆積物微生物群集の代謝および構造を監視することは、海底環境における生物地球化学過程とその生態学的な影響を理解する上で必須である。本研究の目的は大村湾の貧酸素状態 (Dead zone) の堆積物における微生物の潜在的な群集呼吸活性を明らかにし、微生物群集の動態を解明することである。大村湾は非常に閉鎖性であり、毎年夏季には中央部が極度の貧酸素状態に陥る。我々は、貧酸素状態の湾中央部から堆積物コアサンプルを採取し、in vivo 電子伝達系活性 (ETSA) 測定法を用いて堆積物の酸素消費量を見積もるとともに、堆積物中の細菌と線虫の現存量を定量した。さらに、細菌群集構造を automated ribosomal intergenic spacer analysis (ARISA) 手法によって解析した。その結果、大村湾の縁辺部と比較して、中央部の表層 (3cm以浅) 堆積物ではETSA活性が高いだけでなく、線虫の現存量や細菌の多様性も高いことがわかった。湾中央部の細菌群集構造は縁辺部のものとは大きく異なっていた。これらの結果から、大村湾中央部の貧酸素状態の表層堆積物は、縁辺部と比較して、(1) 微生物群集呼吸活性が高く、(2) 線虫の現存量が多く、(3) 細菌群集の多様性が高いという特徴を持つことが示唆された。これらの特徴には、大村湾の微生物群集と貧酸素水塊の発達の間接的な関係を理解する上で重要な意義がある。

表 2

Community oxygen consumption rates of Omura Bay sediment inferred from *in vivo* ETSA

a. overlying water

Average ± SD ($\mu\text{M O}_2/\text{h}$)	Center	South Fringe
	0.14 ± 0.050	0.01 ± 0.004

b. sediment

Depth	SOC ($\mu\text{L O}_2/\text{g/h}$)	SD (n=3)
Center 0-5 mm	2.1	1.9
Center 5-10 mm	0.57	*0.27
South Fringe 0-5 mm	0.43	0.13
South Fringe 5-10 mm	0.01	0.12

*: range of the two data

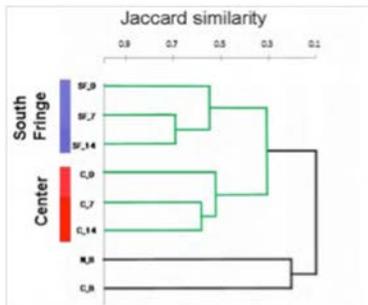


Figure 1. Dendrogram constructed from the rITS fragment profiles of bacterial community represented by ARISA of sediment and bottom water of Omura Bay. C_9, SF_9: 0-7 mm depth sediments of the center and south fringe; C_7, SF_7: 7-14 mm depth of the center and south fringe; C_14, SF_14: 14-21 mm depth of the center and south fringe; C_8, SF_8: Bottom water of the center and south fringe

図 7 大村湾中央部と縁辺部のバクテリア群集の類似度

5) 大村湾中央部で採取した柱状堆積物中の渦鞭毛藻シストからみた水質環境変遷

渦鞭毛藻シスト分析用試料 (長さ 13cm) は大村湾中央 (32°50'54.7" N、129°50'49.1" E) で採取した。時間分解能を上げることにより詳しく大村湾の水質環境変遷を明らかにした。²¹⁰Pb 法で算出した平均堆積速度は、0.14cm/year であった。¹³⁷Csは海底面下 6-8cmで有意な増加があった。

・渦鞭毛藻シスト群集組成の変化

出現が確認された渦鞭毛藻シストは、独立栄養性種と従属栄養性種などの 29 種で *Spiniferites* 属、*Tuberculodinium* 属、*Votadinium* 属、*Polykrikos* 属が優占した。

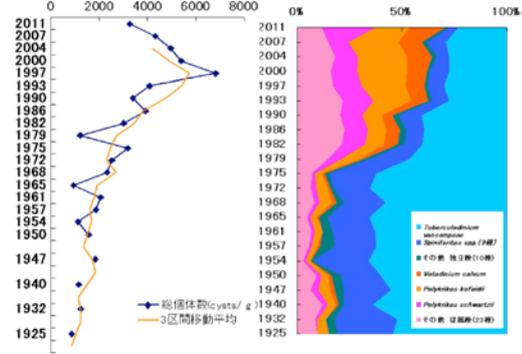


図 8 渦鞭毛藻シスト密度と独立栄養性種シストと従属栄養性種シストの相対頻度の変化

1925年から1975年までは独立栄養性種がシスト全体の約80%を占めていたが、1979-1993年にかけて従属栄養性種が31.6から62.6%と増加し、2011年には70.4%を占めた。独立栄養性種 *Spiniferites* 属は、1925-2011年までの平均値が350 cysts/gで、134 cysts/g から708 cysts/g の間で増減を繰り返した。中でも1965年と2011年にはそれぞれ184 cysts/g、134 cysts/gと少なく、1975年と1997年には708 cysts/g、532 cysts/gと多くなった(図8)。独立栄養性種 *T. vancampoeae* は、*Spiniferites* 属と同様に増減を繰り返したが、1965年と1979年は612 cysts/g、560 cysts/g と少なく、1975年と1997年には 1984 cysts/g、2029 cysts/gと多産した。従属栄養性種 *Votadinium calvum* は1979-1997年に19 cysts/gから607 cysts/g へと大きく増加した後、1997年以降は479 cysts/gから606 cysts/g の間で安定して産した。従属栄養性種 *P. kofoidii* は、1965年から徐々に増加し、1979-1997年にかけては110 cysts/gから1430 cysts/gと著しく増加したが、1997-2011年には1430 cysts/gから546 cysts/gと減少した。

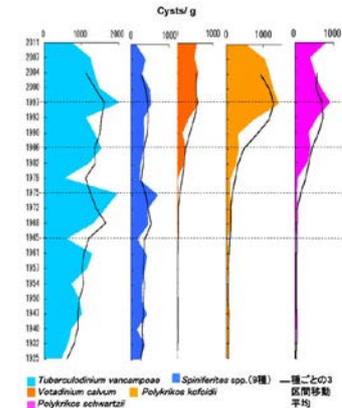


図 9 優占種のシスト密度変化

従属栄養性種 *P. schwartzii* も1979-1997年にかけては72 cysts/gから929 cysts/gに増加し、その後2007年には410 cysts/gまで減少したが、2011年にかけて815 cysts/gまで増加した (図9)。

本調査・研究で明らかになった渦鞭毛藻シスト群集組成変化を見ると、1965-1975 年では独立栄養性種 *T. vancampoeae* など独立栄養性種シスト密度が増加しており、さらに 1975-1997 年頃に従属栄養性種のシスト密度や比率も増加した。これに対して 1997 年頃から総シスト密度

が減少傾向を示し、特に独立栄養性渦鞭毛藻が明らかに減少している。ここで従属栄養性種である *P. schwartzii* や *P. kofoidii* なども減少傾向にあることは、被捕食者すなわち独立栄養性渦鞭毛藻の減少を反映していると推察される。しかし、従属栄養性渦鞭毛藻は独立栄養性渦鞭毛藻だけでなく珪藻や従属栄養性バクテリアなども餌料するため、従属栄養性渦鞭毛藻のシストの増減は珪藻や従属栄養性バクテリアの増減に少なからず反映されると考えられる。従って、渦鞭毛藻シスト群集変化が示す大村湾の栄養塩環境は、1965年以降富栄養化が始まり、更に1975年以降にその富栄養化が更に促進したが、1997年以降現在まで富栄養化の進行は停止し、栄養塩が減少傾向にある状況を反映していると推察できる。

COD は栄養塩の増減を直接的に反映するのではないが、大村湾中央部の COD75%値の変遷をみると、1970年代から1980年代前半にかけて 1.23 mg/l から 3.07 mg/l と増加し、1980年代後半から2000年代前半まで平均 2.5mg/l (変動幅 3.03~2.23 mg/l であったが、2000年代後期に平均値 2.3 mg/l (変動幅 3.23~2.20mg/l) と減少した(長崎県・環境白書2009)。これらの変化は1965年頃から渦鞭毛藻シストが増加し始めたのと COD 値が増加した時期が合致しており、また1997年以降の減少と COD 値が減少した時期が合致することから、1965年頃から富栄養化が進行し、1997年以降に富栄養化の進行が停止し、栄養塩減少傾向になったことを裏付けている。

渦鞭毛藻シストの増加は栄養塩のうち、 PO_4^{3-} 増加との関連が考えられ、その起源は貧酸素水塊の増加に伴う底質からの PO_4^{3-} の選択的溶出を反映している可能性が考えられる

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5件)

1. Wada, M., Suzuki, S., Nara, T., Umezawa, Y., Shimanaga, M., Matsuoka, M., Nakata, H. Microbial community respiration and structure of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. *Journal of Oceanography*. (in press)
2. Matsuoka-K., Kawami, H. Phylogenetic subdivision of the genus *Protoperdinium*, (Peridiniales, Dinophyceae) with special emphasis of the *Monovela* Group. *J. Micropaleontol* (Dino9 volume). (in press)
3. 松岡数充 渦鞭毛藻シストは富栄養化指標として有効か? 日本プランクトン学会誌, no. 58, 2011, pp.55-59.
4. Wada, M., Dan, Z, Do H-K, Nomura, H, Kunihiro, T, Nishimura, M, Koture, K, Ohwada, K, Tsutsumi, K. Estimation of Abundance and Diversity of Bacteria associating with Burrow Lining of *Capitella* sp. I in Seawater Soft-Agar Microcosm. In Coastal Environmental and Ecosystem Issues of the East China Sea, Nagasaki University Major Research Project "Restoration of Marine Environment and Resources in East Asia", 2010, pp. 165-172, TERAPAB and Nagasaki University.
5. Shin, H-H, Mizushima, K., Seok Jin Oh, S-J., Park, J-S., Noh, I-H, Iwataki, M., Matsuoka, K., Yoon, Y-H. Reconstruction of historical nutrient levels in Korean and Japanese coastal areas based on dinoflagellate cyst assemblages. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 60, 2010, pp. 1243-1258.

[学会発表] (計6件)

1. Wada, M., Suzuki, S., Nara, T., Matsuoka, K., Nakata, H. 2011 Microbial community respiration and structure of dead zone sediments of Omura Bay, Japan. 8th International workshop on the Oceanography and Fisheries Science of the East China Sea. November 24-25,

2011; Naha, Okinawa, Japan.

2. 牟田直樹・松岡数充・梅澤有 (2011) 大村湾における栄養塩溶出の時空間的変動の解明. 2011年度日本海洋学会秋季大会(ポスター) 2011年9月28日, 福岡市.
3. 日野出賢二郎・山口仁士・梅澤有・和田実・松岡数充 (2011) 長崎県大村湾におけるメソコスム実験からみた植物プランクトン群集の変化. 2011年日本ベントス学会・日本プランクトン学会大会(ポスター) 2011年9月18日. 高知市.
4. Sarai, C. and Matsuoka, K. New findings of the unsolved cyst-theca relationship of the *Protoperdinium oblongum*-complex. International Workshop; THINKING BIG ABOUT THINGS SMALL: HOW TO LINK PACIFIC TO ATLANTIC DINOFLAGELLATES? p. 17, Nagasaki, 21st-23rd May 1-22, 2011; Nagasaki, Japan.
5. 仲田希望・松岡数充 (2010) 西九州大村湾でのセディメントトラップ実験による渦鞭毛藻シスト形成時期の環境. 2010年度日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会(口頭). 2010年10月8日, 柏市(千葉).
6. 遠山祐一・中田英昭・高橋鉄哉 (2009) 夏季の大村湾における風の変動特性 - 湾奥部の青潮発生との関連 -. 2009年度水産海洋学会研究発表大会講演要旨集(口頭) 2009年11月18日, 長崎市.

[その他]

ホームページ等 無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松岡 数充 (MATSUOKA KAZUMI)

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・教授

研究者番号: 00047416

(2) 研究分担者

中田 英昭 (NAKATA HIDEAKI)

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・教授

研究者番号: 60114584

山口 仁士 (YAMAGUCHI HITOSHI)

長崎大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10359143

梅澤 有 (UMEZAWA YU)

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・助教

研究者番号: 50442538

和田 実 (WADA MINORU)

長崎大学・大学院水産・環境科学総合研究科・准教授

研究者番号: 70292860