

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月11日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (特設分野研究)

研究期間：2016～2018

課題番号：16KT0143

研究課題名(和文) 沿岸域の漁業生産を支える粒状有機物の生態学的機能分類と生態系モデルの高度化

研究課題名(英文) Classification of particulate organic matter based on ecological functions and enhancement of ecological modelling for management of coastal fishery production

研究代表者

坂巻 隆史 (Sakamaki, Takashi)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60542074

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：南三陸町志津川湾での野外調査より、浮遊性粒状有機物の各サイズ画分の化学的組成(脂肪酸組成、生元素安定同位体比等)の季節変動および空間分布のパターン、およびそれらへの外洋水・河川水流入やカキ養殖場の影響が明らかになった。また、栄養塩負荷と水温上昇に対する各サイズ画分粒子の生産性の応答、および粒状有機物の質・組成とその酸素消費活性を屋内実験により検討し、粒状有機物の生産・分解過程についてサイズ画分ごとの環境変動への応答特性が整理された。

今後は、粒子サイズおよび脂肪酸動態の視点から粒状有機物動態をモデル化することで、生物地球化学的過程や養殖生物の生産性をより高い精度で評価できることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義としては、沿岸海域における食物網・物質循環過程において重要な位置づけにある粒状有機物の動態について、特に、そのサイズ分画や脂肪酸組成と生産・呼吸という機能的側面の関係を明らかにしたことが挙げられる。この研究において得られたそれらの成果は、特に、人為的物質負荷と水産養殖をいかに調和させるかなど、沿岸海域における環境管理・漁業管理の様々な問題を考えるうえで重要なツールとなる生態系モデルの高度化を図るうえで寄与が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Based on field surveys, we clarified patterns in seasonal and spatial variations of chemical compositions (fatty acid compositions and C & N stable isotope ratios) of particulate organic matter (POM) as well as effects of offshore and river water inputs and oyster farming on POM dynamics in Shizugawa Bay. Furthermore, based on laboratory experiments, we revealed effects of environmental changes, such as nutrient inputs and temperature increase, on production and respiration of POM. Our results demonstrate that modelling POM dynamics taking account of particle size and fatty acid compositions of POM potentially enhance substantially assessments for effects of environmental changes on biogeochemical processes and fishery productions by aquacultures.

研究分野：応用生態学、水環境工学

キーワード：内湾生態系 養殖漁業 有機物動態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

沿岸海域は水産物の生産・漁獲の場としてきわめて重要であり、そこでの食料生産の機能を持続させることは人類生存の観点からも必要不可欠である。一方で、各地の沿岸海域では、陸域での人間活動にともなう様々な物質負荷が流入し、富栄養化・有機汚濁と生物多様性・生態系機能低下が起こっている。一方、環境政策として一貫して進められてきた下水処理の拡大・高度化による栄養塩負荷の低下が水産養殖の生産性低下を招いたとの推測から下水処理緩和が試みられている例もある。また、養殖魚類への投餌やカキ等垂下養殖生物の排糞による底質悪化・底層貧酸素化は生産基盤としての生態系劣化につながり、漁業生産へ負のフィードバックをもたらしている。さらに、過密な垂下養殖によるプランクトンの不足が生産性低下をもたらすことも水産養殖の現場では広く認知されている。このような背景から、様々な環境変動・改変がある中で、沿岸海域における漁業生産を持続させる環境管理方策が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、沿岸海域の海水中粒状有機物のサイズ分画と脂肪酸組成分析による生態学的機能分類を行い、生態系モデルの高度化に資する知見の提示や粒状有機物に基づく沿岸海域モニタリングの有効性を検討することを目的とした。

具体的には、南三陸町志津川湾を対象として、(1)サイズ分画と脂肪酸組成分析を掛け合わせて沿岸海域海水中の粒状有機物の分類を行い、志津川湾における粒状有機物動態の時空間変動パターンの解明、(2)粒状有機物各サイズ画分の、物理特性(沈降速度等)、化学組成(脂肪酸組成、元素組成・炭素窒素安定同位体比)、代謝特性(一次生産、呼吸、栄養塩回帰等)など生態学的な機能・役割の評価、(3)河川水等の湾外起源の水の流入にともなう湾内の一次生産および各種一次生産者分類群の生産や組成への影響の解明、(4)湾内の表層・底層・養殖場内外など様々な条件化から採取された粒状有機物の酸素消費活性を定量しその化学組成との関係の解明に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 志津川湾における粒状有機物動態の調査

宮城県南三陸町志津川湾において季節採水調査を実施し、湾内における粒状有機物の時空間変動のパターンを調査した。特に、2015~2017年に1~4定点で採取された粒状有機物の採取試料については、ろ過によりサイズ分画を行い(0.7~2 μ m, 2~20 μ m, 20~250 μ m)、各画分の有機物量や脂肪酸・元素組成等を測定した。

(2) 粒状有機物の代謝特性の評価

同湾から採取された海水について屋内でのインキュベーション実験を行い、各サイズ分画の代謝特性(一次生産、呼吸、栄養塩回帰等)を評価した。実験は、粒子の潜在的な生産・呼吸活性を定量するため、海水をバイアルに封入し、水温や添加栄養塩濃度をそれぞれ3~4通り程度変えて、振とう式恒温水槽内でインキュベーションする方法で行った。生産速度および呼吸速度は、バイアル中海水の溶存酸素濃度の時間変化を非接触蛍光式溶存酸素計(PreSens社)により測定することで定量した。

(3) 湾外起源水の湾内一次生産および生産者分類群組成への影響評価

同湾から採取された海水に、様々な湾外起源水(流域環境の異なる3河川、地下水、低層水、外洋水)を体積割合10%でそれぞれ添加し、屋内で培養実験を行った。7~10日程度の培養後、粒状有機物をろ過して有機炭素・窒素、脂肪酸組成等の分析を行った。

(4) 粒状有機物の呼吸活性と化学組成の関係解析

湾内の養殖場内外の表層付近・底層など様々な条件から四季にわたって海水中の粒状有機物を採取し、上記と同様の方法で屋内にて酸素消費活性を定量した。さらに、その粒子の脂肪酸等化学組成分析を実施し、各種化学指標と酸素消費活性の関係を解析した。

4. 研究成果

(1) 志津川湾における粒状有機物動態と各サイズ画分の化学組成

各種マーカー脂肪酸濃度や粒状有機窒素濃度は、湾内地点間(湾口部、湾中部、湾中養殖場、湾奥河口部)の差よりも季節影響が相対的に大きかった(図1・図2)。特に、温暖期にそれらの濃度が高くなり、冬季に低くなる傾向があった。これに対して、粒状有機炭素濃度については地点間の差がより大きく、特に河口の地点がほかの3地点と比較して濃度が高かった。

珪藻、緑藻、渦鞭毛藻由来のマーカー脂肪酸については、季節的には春から夏にかけて濃度が増加し、冬にかけて減少していく傾向が明瞭であった。また、空間的にも際は認められ、河口の地点が4点の中で藻類に由来するマーカー脂肪酸の濃度が最も高くなる場合が多かった。さらに、河口、養殖場、航路の内湾の3点では夏に濃度が最大となる傾向にあるが、外洋の点では春に濃度が最大となる傾向がみられた。

細菌由来のマーカー脂肪酸については、特に春に濃度が高くなる傾向があった。空間的には、年間を通して河口の地点で比較的大きかった。一方、陸上植物由来のマーカー脂肪酸濃度は、季節的には藻類マーカー脂肪酸や細菌由来マーカー脂肪酸ほどはっきりした傾向を示さなかった。陸上植物由来のマーカー脂肪酸濃度の空間的な分布パターンは、藻類や細菌のマーカー脂肪酸濃度に比べて不規則で、調査によって、地点間差があまりない、河口地点で最大、湾口地点で最大など様々なケースがみられた。

粒状有機物の濃度・化学組成と環境因子(水温・無機態栄養塩)の関係については、特に、藻類マーカー脂肪酸の濃度が水温と有意に正の関係を有した。藻類の生産が、温暖期に活発化することによって考えられる。しかし、粒状有機炭素濃度は低水温時にも大きな値が計測されることもあり、水温とは有意な関係を示さなかった。出水などにより藻類を含まない異地性の有機物の流入などの影響が考えられた。溶存態無機窒素・リン濃度と粒状有機炭素濃度および藻類マーカー脂肪酸濃度の関係については、藻類マーカー脂肪酸濃度が増加すると溶存態無機窒素・リン濃度が小さくなり非常に低い濃度になる傾向がみられた。これは、比較的低栄養の志津川湾では、温暖期に藻類生産が活発化すると栄養塩の枯渇が起こっているためと考えられた。

サイズ画分間での比較では、通常、粒状有機物としての有機炭素および藻類のマーカー脂肪酸とも、最も大きな画分 20-250 μm が占める割合が最も低く、0.7-2 μm と 2-20 μm の画分が概ね同等程度で多くを占めた。一方、細菌のマーカー脂肪酸については、最も小さな画分 0.7-2 μm が全量の半分程度もしくはそれ以上を占めるケースが多かった。しかし、2015年春季のサンプリング時のみ、藻類と細菌のマーカー脂肪酸ともに、最も大きなサイズ画分 20-250 μm の占める割合が最大となった。同サンプリング時は親潮水塊の接近があったと考えられており、その際通常とは異なるサイズ組成を有した粒状有機物が湾内に流入した影響ではないかと考えられる。

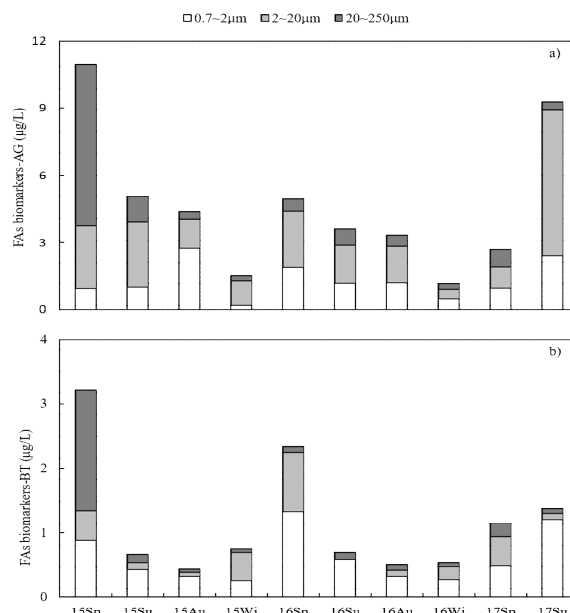


図1 志津川湾での2015年春季から2017年夏季にかけての季節調査における各サイズ画分のマーカー脂肪酸濃度。AG: 藻類脂肪酸マーカー（緑藻+珪藻+渦鞭毛藻）、BT: 細菌脂肪酸マーカー、Sp: 春季, Su: 夏季, Au: 秋季, Wi: 冬季。

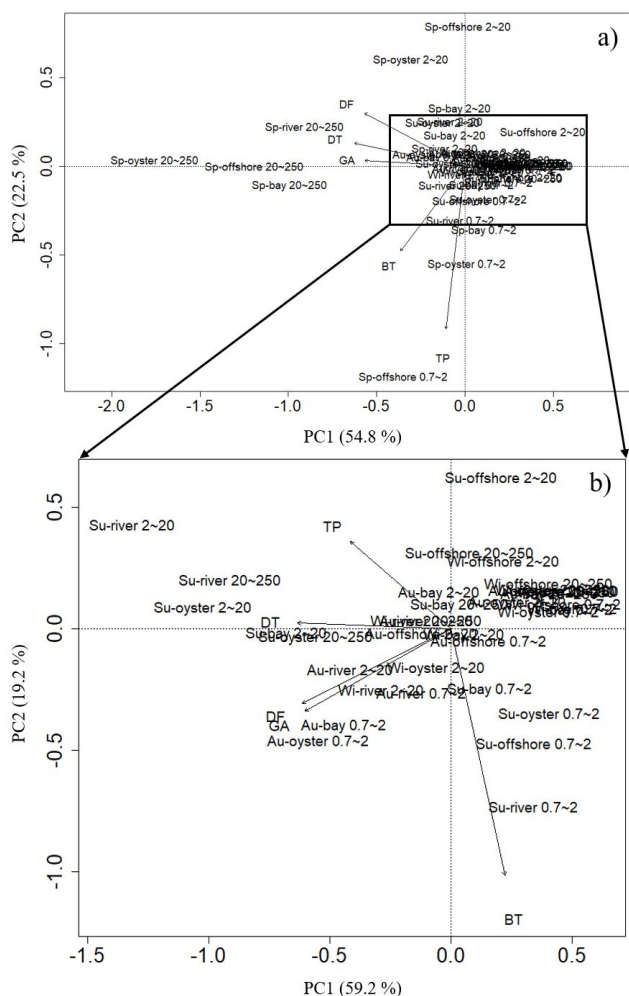


図2 志津川湾で2015年春季から実施した季節調査1年間における各サイズ画分の各種マーカー脂肪酸濃度についての主成分分析の結果。BT: 細菌, GA: 緑藻, DT: 珪藻, DF: 渦鞭毛藻, TP: 陸上高等植物, offshore: 湾口, bay: 湾中, oyster: 湾中養殖場, river: 湾奥河口。a) 全4季のデータによる解析結果, b) 2015年春季を除いた3季のデータによる解析結果。

(2) 有機物の生産・呼吸活性
 粒状有機物の単位炭素量あたりの生産と呼吸の活性はともに中間のサイズ画分 2-20 μm で他の画分 20-250 μm と 0.7-2 μm を上回った。特に、最も大きなサイズ画分の粒子の単位炭素量あたりの生産・呼吸活性が他のサイズ画分を下回ったことについては、単位炭素量あたりの脂肪酸濃度が他のサイズ（特に中サイズ）と比べ低かったことから、生物的な活性が全般的に相対的に低かったと考えられる。一方で、栄養塩濃度や温度の変化に対して最も大きな応答を示したのは大きなサイズ画分であった（図3）。特に栄養塩濃度の上昇に対して、大サイズ画分の一次生産は顕著に増加した。また、 ± 3 度の水温上昇・低下はともに、大サイズ画分の一次生産活性を増大させた。

温度と栄養塩をマトリクス的に操作した実験では、全般的に、栄養塩添加が水温上昇よりも強く作用し粒状有機物の生産を高めることが示された。また、その際、温度・栄養塩の諸条件により生産される粒状有機物の脂肪酸組成も大きく変化した（図4）。また、顕微鏡観察による藻類同定の結果、実験条件の違いによる脂肪酸組成の変化は、種組成の変化にともなうものであることが確認された。

(3) 湾外起源水の湾内一次生産と生産者分類群組成への影響

湾外起源水と内湾水の混合培養実験の結果、粒状有機炭素濃度は培養前後を比較すると全系で増加していた。河川 1・2・3 および地下水を混合した系で大きく増加し、最大で約 5 倍となっていた。一方で、外洋水や底層水を混合した系は比較的増加量が小さく 2 倍程度であった。脂肪酸組成については、細菌、珪藻、緑藻等、渦鞭毛藻由来のマーカ-脂肪酸が全系で培養後に増加した（図5）。脂肪酸ごとに見ると、最も増加率が大きかったのは珪藻由来マーカ-脂肪酸で、培養前と比較して最大で地下水の系で約 12 倍に、最小の底層水の系でも約 4 倍に増加していた。渦鞭毛藻、緑藻等由来のマーカ-脂肪酸でも同様の傾向が得られ、増加率が地下水の系で最大に、底層水の系で最小になっており、1.5~4.5 倍程度の増加率であった。これに対して、細菌由来のマーカ-脂肪酸の増加率は河川 1 の系で最大で約 4.5 倍、次いで河川 2、河川 3 の順となっており、河川水の添加系で大きかった。最小は底層水の系で培養前のおよそ 1.4 倍であった。

細菌由来のマーカ-脂肪酸濃度は系の初期の硝酸

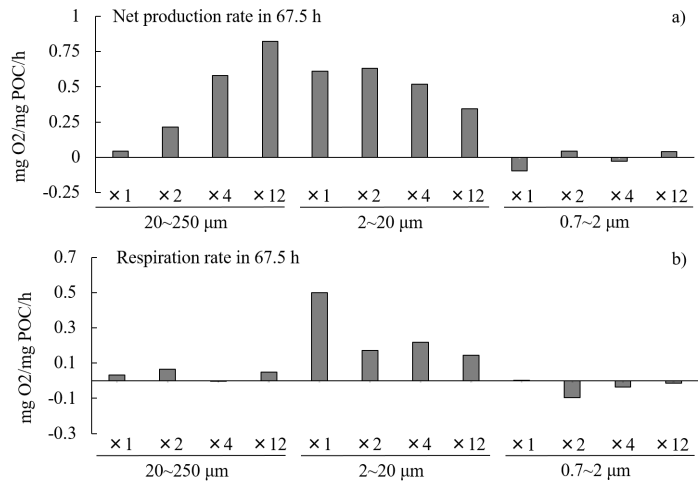


図3 栄養塩濃度を操作した屋内実験系における各サイズ画分の粒状有機物単位炭素量あたりの生産および呼吸速度。培養実験開始後 67.5 時間にわたる測定結果に基づく。

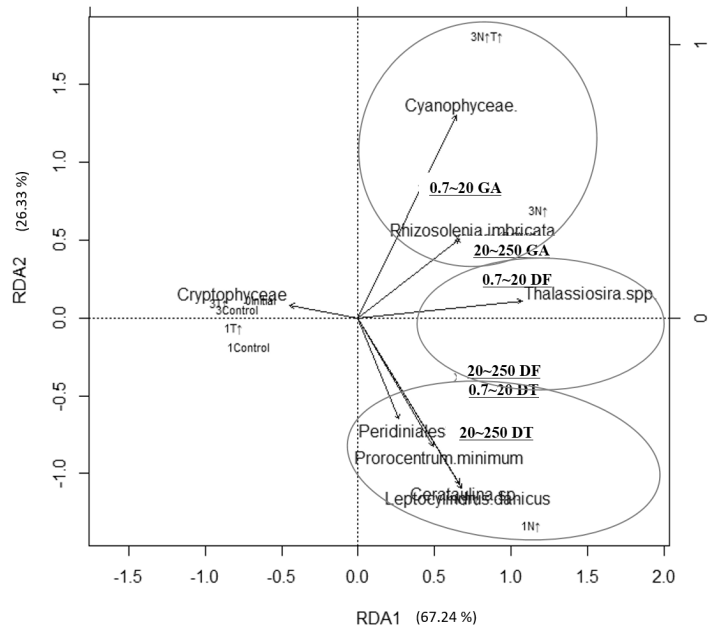


図4 温度と栄養塩を操作した培養実験において生産された粒状有機物のマーカ-脂肪酸組成に関する冗長性分析結果。目的変量は各サイズ画分のマーカ-脂肪酸の全脂肪酸に占める割合、説明変量は顕微鏡測定による微細藻類分類群による細胞計測数である。培養1週間後と3週間後の結果を示す。Control: 対照系, N \uparrow : 栄養塩添加系, T \uparrow : 温度上昇系, N \uparrow T \uparrow : 栄養塩・温度をともに増加させた系。GA: 緑藻マーカ-脂肪酸, DF: 渦鞭毛藻マーカ-脂肪酸, DT: 珪藻マーカ-脂肪酸。

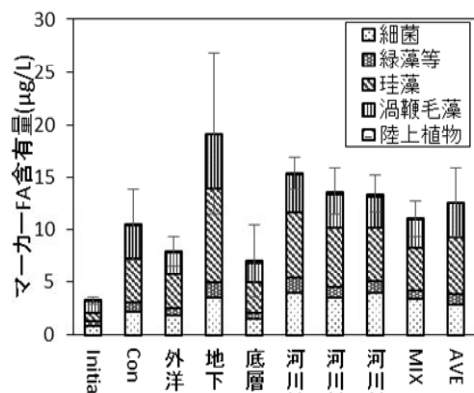


図5 培養実験開始時および終了時の各系における各種マーカ-脂肪酸濃度

態窒素濃度が大きいほど有意に($R^2=0.69, p=0.003$)増加していた。一方、珪藻、緑藻等及び渦鞭毛藻由来マーカー脂肪酸濃度は初期の硝酸態窒素濃度との間に有意な関係がなかった。一方、珪藻及び渦鞭毛藻由来マーカー脂肪酸濃度は、初期のリン酸態リン濃度と有意な正の関係を示した(珪藻: $R^2=0.52, p=0.012$, 渦鞭毛藻: $R^2=0.53, p=0.010$)。緑藻等および細菌由来のマーカー脂肪酸濃度とリン酸態リン濃度の間に有意な関係はみられなかった。

培養開始時の無機態の N/P 比によって増加するマーカー脂肪酸の組成が異なっていたことについては、一次生産者によって要求する栄養塩が異なっていたことを反映していたと考えられる。さらに本実験では、実験終了時にいずれの系でも硝酸態窒素が枯渇しリン酸態リンが若干残存していたことから、細菌類と珪藻、渦鞭毛藻等の藻類が窒素を巡って競合関係にあったと推察される。N/P 比が大きいとき、すなわち窒素が相対的に豊富にあるときは、藻類の生産が抑制されていたことから、細菌が優占し藻類が窒素を利用する前に細菌が窒素を利用し尽くし、結果として細菌由来のマーカー脂肪酸割合が増加したと考えられる。

(4) 粒状有機物の呼吸活性と化学組成の関係

カキ養殖場内外における調査では、POC 濃度あたりの脂肪酸濃度が季節間・水深間・養殖場内外間でそれぞれ大きく異なった(図6)。特に水深 2m・10m より採取された海水中の粒状有機物については、夏季には緑藻・渦鞭毛藻等由来のマーカー脂肪酸の含有率が大きく、さらにカキ養殖場外の方が場内よりも有意に大きかった。秋季はカキ養殖場内外で顕著な差異がみられなかった。冬季・春季は特にカキ養殖場内において細菌や珪藻由来のマーカー脂肪酸の含有率が高かった。また、緑藻・渦鞭毛藻・珪藻・細菌の各マーカー脂肪酸含有率は互いに正の相関関係を示したが、高等植物由来のマーカー脂肪酸は他のマーカーと明らかに異なる挙動を示し相関がなかった。一方、底層海水中の粒状有機物に関しては、2m・10m 層のそれと比べて緑藻・渦鞭毛藻・珪藻マーカー脂肪酸の含有率が顕著に低いとともに、粒状有機物に含有される脂肪酸組成が、養殖場内外間での差異が認められず有機物の分解と混合が進んでいたと考えられる。

酸素消費速度が最も大きかった夏季に、粒状有機物の藻類(緑藻、渦鞭毛藻、珪藻)由来マーカー脂肪酸量と酸素消費速度の間に正の関係がみられ、藻類由来の有機物の存在が酸素消費に大きく寄与していたと考えられる(図7)。これについては、藻類自身による呼吸と死んだ藻類の分解にはたらく従属栄養細菌による呼吸の2つが主な機構として考えられる。本調査の結果において藻類と細菌のマーカー脂肪酸量の間には正の関係が認められたが、生きた藻類からの細胞外分泌物の細菌による利用と増殖や死んだ藻類を分解する細菌の増殖など、一般的に知られている藻類と細菌の生態学的な関係を反映したものと考えられる。

カキ養殖場内において、場外と比較して藻類と細菌由来マーカー脂肪酸の関係が弱く、さらに場外でみられたような細菌由来マーカー脂肪酸と酸素消費に正の相関関係がみられなかった。これらのことから、カキ養殖場内では特に藻類由来の脂肪酸が相対的に少なく、有機物分解性および酸素消費が場外に比べて低下していたと考えられる。カキによる過摂食により藻類起源の有機物が選択的に除去されている可能性、養殖施設やカキに付着・堆積し海水中に供給される有機物中の藻類起源有機物の割合が海水中に元より存在している有機物のそれよりも低いことなどが考えられ、これらは養殖場内の海水

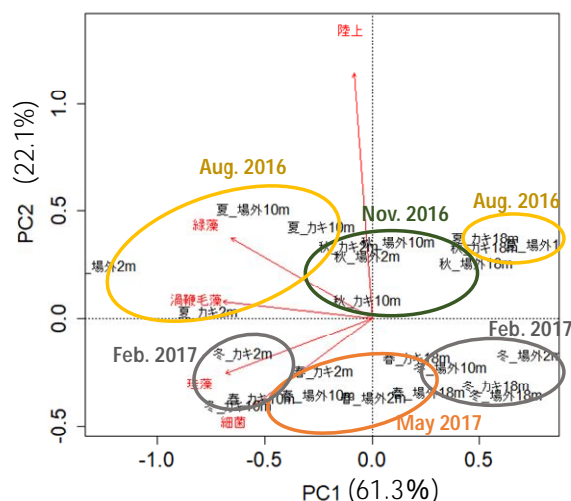


図6 2016年夏季から4季にわたって行われたカキ養殖場内外での調査におけるPOC濃度あたりの各種マーカー脂肪酸濃度についての主成分分析結果。

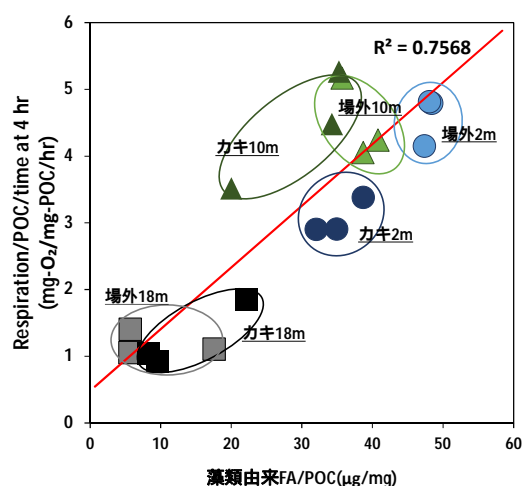


図7 2016年夏季調査におけるカキ養殖場内外・各水深帯における粒状有機物の藻類(緑藻+珪藻+渦鞭毛藻)マーカー脂肪酸含有量と酸素消費活性の関係。

中に漂う有機物の分解性が場外よりも低い要因である可能性がある。一方で、カキ養殖場内では、POC 濃度が増加しているため、分解性の低下した有機物の沈降量が増加することで底質の悪化を招く可能性もあわせて示唆された。

(5) 粒状有機物動態を捉えるうえでのサイズ分画・脂肪酸の有用性

一連の調査において、海水中の POC 濃度と水塊の酸素消費速度の間には有意な関係が認められなかった。このことは、酸素消費をはじめ生物的な代謝過程を粒状有機物の量的指標のみをもって予測あるいはモデル化することに問題があることを意味する。本研究で用いた脂肪酸マーカーは、粒状有機物の酸素消費と有意な関係性を示したことから、粒状有機物の質的側面と代謝過程の特性を反映する指標として有用であることが期待できる。一方、サイズ分画については、各画分によってその化学組成や代謝活性が異なっていたものの、粒状有機物のサイズ組成自体を規定する要因などについて不明な点が多かった。粒状有機物のサイズ組成や脂肪酸組成の情報は、有機物動態やその生物過程での役割を検討するうえで有用であることが示されたといえるが、生態系モデルへの連結に向けては、粒状有機物のサイズや化学組成を規定する機構などについてさらなる検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. 大原光司, 湯上洋平, 川畑達矢, 藤林恵, 西村修, 坂巻隆史 (2018) 脂肪酸組成分析を利用した内湾一次生産の制限因子の評価, 土木学会論文集 G (環境), 74(7): III_53-62. (査読有)
2. 川畑達矢, 藤林恵, 湯上洋平, 西村修, 坂巻隆史 (2018) 海水中粒状有機物の化学組成と酸素消費に及ぼすカキ養殖場の影響, 土木学会論文集 G (環境), 74(7): III_63-72. (査読有)
3. 小松輝久, 佐々修司, 門谷茂, 吉村千洋, 藤井学, 夏池真史, 西村修, 坂巻隆史, 柳哲雄 (2018) 開放性内湾を対象とした沿岸環境管理法の研究: 南三陸志津川湾の例, 沿岸海洋研究, 56(1): 21-29. (査読有)
4. Y. Zheng, K. Hayashi, T. Matsuno, M. Fujibayashi, M. Nomura, O. Nishimura, T. Sakamaki (2016) Interaction between biogeochemical environment and oyster farming in Shizugawa Bay, Japan, Proceedings of EMECS'11-SeaCoasts XXVI Joint Conference. USB (査読無)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 湯上洋平, 大原光司, 西村修, 坂巻隆史 (2019) 志津川湾奥部の脂肪酸生産に及ぼす湾外からの窒素・リン流入の影響. 第 53 回日本水環境学会年会
2. 川畑達矢, 畠山勇二, 西村修, 坂巻隆史 (2019) 脂肪酸分析を用いた内湾カキ養殖場の粒状有機物動態と酸素消費への影響評価. 第 53 回日本水環境学会年会
3. Takashi Sakamaki, Tatsuya Kawahata, Youhei Yugami, Megumu Fujibayashi, Osamu Nishimura (2018) The dynamics of particulate organic matter and implications for sustainable oyster aquaculture in Shizugawa Bay. The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12)
4. Youhei Yugami, Koji Ohara, Osamu Nishimura, Takashi Sakamaki (2018) Effects of river and offshore water on primary production in the inner part of Shizugawa Bay. The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12)
5. Tatsuya Kawahata, Youhei Yugami, Osamu Nishimura, Takashi Sakamaki (2018) Assessing the dynamics of particulate organic matter and potentials of hypoxia formation in oyster farms of Shizugawa Bay. The 12th International Conference on the Environmental Management of the Enclosed Coastal Seas (EMECS 12)
6. 湯上洋平, 松野匠, 西村修, 坂巻隆史 (2017) 志津川湾内の有機物組成に及ぼす外洋水の影響, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会
7. 坂巻隆史, 川畑達矢, ジョン・イジョウ, 西村修 (2017) 内湾の粒状有機物動態と底層環境に及ぼすカキ養殖の影響, 日本水環境学会年会
8. ジョン・イジョウ, 川畑達矢, 西村修, 坂巻隆史 (2017) 志津川湾におけるプランクトン群集の各サイズ画分の生産と呼吸に及ぼす栄養塩添加の影響, 日本水環境学会年会
9. 坂巻隆史, 松野匠, 鄭翊喆, 西村修 (2016) 炭素安定同位体比と脂肪酸組成の分析に基づく志津川湾における粒状有機物動態の解析, 日本水環境学会シンポジウム

〔図書〕(計 1 件)

1. 坂巻隆史, 西村修 (2019) 森は海の恋人か, 持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 (柳哲雄編著, 公益財団法人国際エメックスセンター), 52-65.

6. 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。