

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05776

研究課題名(和文) 陸奥湾における持続的な二枚貝養殖のための貧栄養化のメカニズム解明と対策提言

研究課題名(英文) Understanding the Mechanisms of oligotrophication in Mutsu Bay for sustainable bivalve culture

研究代表者

工藤 勲 (KUDO, Isao)

北海道大学・水産科学研究院・教授

研究者番号：00195455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ホタテガイ垂下養殖漁業が行われている青森県陸奥湾で、近年栄養塩濃度が減少する「貧栄養化」が起こっていることが明らかとなった。本研究は、持続的な生物生産活動の維持を脅かしかねない海域の「貧栄養化」のメカニズムを解明し、貧栄養化の効果的な方策を提言することを目的として行われた。夏季に栄養塩は枯渇状態にあり、この時期の基礎生産(ホタテガイの餌生産)は栄養塩が不足していた。海底耕耘により海底に埋没した栄養塩の回帰効果があることが確認され、その量は海水中に存在する栄養塩の10-20%に相当すると見積もられた。このことから「貧栄養化」の対策として海底耕耘は有効な手段であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「貧栄養化」については、近年日本各地で認識されはじめた新しい現象であり、本研究で取り上げた青森県陸奥湾における「貧栄養化」は、ホタテガイ養殖によって水揚げ及びホタテガイ糞粒の堆積物への除去により栄養塩元素が減少した事が、その要因として考えられる。養殖漁業と栄養塩環境の関係を明らかにする点は、他の「貧栄養化」研究では着目されていない独自の着想である。また、その最終目標として栄養塩が乏しい貧栄養環境において持続的な生物生産活動を行うために、栄養塩を有効に循環させる方策としての海底耕耘の実用性を評価する点は、水産業を持続可能に維持していく将来モデルを創造する基礎となる。

研究成果の概要(英文)：Oligotrophication, a decreasing trend in nutrient concentration has been revealed in Mutsu Bay, where intensive scallop hanging culture is conducted. The objectives of this study are to elucidate the mechanisms of the oligotrophication threatening sustainable biological production in the coastal areas and to propose the effective policies for it. Nutrients were depleted in summer and primary productivity (scallop diet) was depressed by the nutrient deficiency. Bottom sediment cultivation was conducted to examine the enhancement of return of nutrients from the sediment. The amounts of this return were estimated as much as 10-20% of the standing stock in the water column. Thus, the bottom sediment cultivation is an effective option for preventing oligotrophication in this area.

研究分野：海洋基礎生産学

キーワード：栄養塩 基礎生産 海底耕耘 ホタテガイ養殖 物質循環

1. 研究開始当初の背景

ホタテガイ漁業は、1970年代にその養殖技術が確立され、北海道、東北地方の内湾で急速にその生産量が増加した。平成27年度のホタテガイ生産量(生産額)は、北海道においては36万7千トン(976億円)、青森県においては12万トン(262億円)と生産量、生産額とも第一位の水産魚種である。ホタテガイは、植物プランクトンを主な餌源とすることから生態系における栄養段階としては2段目に位置する。また、その過捕食効率は、数 μm 以上の餌粒子については、ほぼ100%である(Shumway and Parsons, 2008)。従って、ほとんどの植物プランクトンを餌として利用可能である。栄養段階間の転送効率を考慮すると植物プランクトンによる一次生産量の10%以上の生産量が期待でき、高次栄養段階の大型魚類を漁獲するより効率の良い魚種である。しかし、その効率の良さゆえに、基礎生産者に対する摂食圧が高く、基礎生産に関わる栄養塩などの循環あるいは存在量に大きな影響を与えることが危惧される。面積がほぼ同等で、同じ緯度帯に位置する内湾の北海道噴火湾と青森県陸奥湾ではホタテガイ垂下養殖が盛んで、ともにほぼ10万トンの年間生産量がある。基礎生産量の多寡を決定する要因である栄養塩濃度を比較すると季節的に最も高濃度の冬期における溶存態無機窒素で、噴火湾は $10\mu\text{M}$ 程度であるのに対して陸奥湾では $2\mu\text{M}$ 程度と噴火湾の五分の一程度である。植物プランクトンの生物量の指標となるクロロフィル a も同様に陸奥湾では噴火湾の十分の一程度と低い。これらのことから、青森県陸奥湾においては、ホタテガイ漁業の基礎生産環境に与える影響が噴火湾より強い可能性がある。実際に青森県の陸奥湾の水深20mにおける溶存態無機窒素の平均濃度は、ホタテガイ漁業が開始された1980年代には $2.52 \pm 1.33\mu\text{M}$ であったが、2000年代には $0.87 \pm 0.82\mu\text{M}$ とこの30年間でおよそ7割減少した(工藤ら, 2014)。陸奥湾において生産効率の高いホタテガイ養殖を今後も安定して持続していくためには、現状のホタテガイ養殖がどの程度海域の栄養塩環境及び基礎生産環境に影響を与えているのかという「問い」に答え、仮にこれらの環境が影響を受けているのであれば、持続的生産を行うためにはどのような方策を取らなければならないかといった「問い」にも答える必要がある。

2. 研究の目的

1970年代以降、急速に生産量が増加したホタテガイ垂下養殖漁業が行われている青森県陸奥湾で、近年栄養塩濃度が減少する「貧栄養化」が起こっていることが明らかとなった。本研究では、持続的な生物生産活動の維持を脅かしかねない海域の「貧栄養化」のメカニズムを解明し、それらを踏まえた上で貧栄養化の対策を検討し、効果的な方策を提言することを目的とする。具体的には、基礎生産に関する環境の現状を把握するために栄養塩無機化の重要なプロセスである底層付近でのアンモニア酸化過程の解明、堆積物から底層水に回帰する栄養塩量を増加させる目的で海底耕耘試験を行いその効果を評価する、ことを目的とする。

3. 研究の方法

栄養塩無機化過程における海底付近でのアンモニア酸化の重要性

a) サンプリング

2018年5月, 9月初旬, 9月下旬, 11月, および2019年7月, 9月, 11月の計7回, 北海道大学附属練習船うしお丸により, 陸奥湾の代表点として設定した地点 N-43 で採水を行った.

b) アンモニア酸化速度および寄与の算出

採集した底層水 (B-1, 2 m) と直上水をそれぞれよく混合した後, 遮光した 60 mL シリンジに採水し, 空気に触れないように三方活栓を用いてアンモニウム塩 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) を現場濃度 + 3-4 $\mu\text{mol N L}^{-1}$, 亜硝酸酸化阻害剤である塩素酸ナトリウム (NaClO_3) を終濃度が 10 mmol L^{-1} となるように添加した. これにアンモニア酸化阻害剤である ATU (Allylthiourea) を終濃度が 86 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (= 10 mg L^{-1}) となるように添加したものと添加を行わなかったものを用意し, 暗所・現場水温下で 72 時間培養を行った. QuAAtro (Bran-Luebbe 社) を用いて栄養塩濃度 (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) を分析した.

ATU 無添加の培養シリンジ 1 本ごとにおける亜硝酸塩濃度の時間変化をプロットし, それぞれを適切な期間において線形近似した直線の傾きを AOA, AOB 両方によるアンモニア酸化速度 (V_{A+B}) とした. また, アンモニア酸化阻害剤 ATU を 10 mg L^{-1} となるように添加した実験区におけるアンモニア酸化速度を AOA のみによるもの (V_A) とした. さらに, 両者の差 ($V_{A+B} - V_A$) を AOB のみによるアンモニア酸化速度 (V_B) と定義し, AOA, AOB それぞれのアンモニア酸化速度を算出した.

海底耕耘等による埋没生元素の海水回帰促進の効果

海底耕耘によって堆積物を攪拌した際に直上水に回帰する栄養塩量を見積もるために, 陸奥湾で採取した柱状試料を実験室に持ち帰り異なる深度まで堆積物を攪拌し, 栄養塩回帰フラックスを測定した. この室内実験より攪拌深度と栄養塩回帰フラックスの関係および季節による効果の違いを明らかにした.

室内実験において得られた結果をもとに着底トロール網を用いて試験的に海底耕耘を行い, その後グリッド観測点を設けて周辺海域の海洋調査を連続して行い, 栄養塩等の 3 次元マッピングを行った. また, トロール調査後の地点において堆積物柱状試料を採取して, 堆積物中および間隙水の生元素 (C, N, P, Si) の鉛直分布から, 耕耘深度を推定した. 室内実験の結果と合わせて海底耕耘によって増加した栄養塩回帰フラックス量を見積り, 貧栄養化対策としての有効性の評価を行った.

4. 研究成果

栄養塩無機化過程における海底付近でのアンモニア酸化の重要性

底層水 (B - 1, 2 m) におけるアンモニア酸化速度 (V_{A+B}) は 2018 年 9 月初旬から 2019 年 11 月の期間でそれぞれ 0-0.142 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$, 0-0.151 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の間で変動し, 直上水におけるアンモニア酸化速度 (V_{A+B}) は 2018 年 5 月から 2019 年 11 月の期間で 0.0072-0.173 $\mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の間で変動した. アンモニア酸化速度が最大となったのは B-2 m, B-1 m, 直上水でそれぞれ 2018 年 9 月初旬, 2019 年 9 月, 2018 年 9 月下旬であり, 底層水と直上水のいずれにおいても 9 月にアンモニア酸化速度が最大となった.

B-2 m におけるアンモニア酸化微生物 AOA (Ammonia Oxidizing Archaea), AOB (Ammonia Oxidizing Bacteria) によるアンモニア酸化速度への寄与 V_A および V_B は 2018 年 9 月初旬から 2019 年 11 月の期間でそれぞれ $0-0.085 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$, $0-0.015 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の間で変動し, B-1 m では同期中にそれぞれ $0-0.104 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$, $0-0.049 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の間で変動した. 直上水におけるアンモニア酸化速度への寄与 V_A および V_B は 2018 年 5 月から 2019 年 11 月の期間でそれぞれ $0.002-0.059 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$, $0.008-0.099 \mu\text{mol L}^{-1} \text{d}^{-1}$ の間で変動した.

アンモニア酸化微生物 AOA, AOB によるアンモニア酸化速度への寄与率は B-2 m, B-1 m, 直上水で異なっていた. 期間中における AOA, AOB の平均寄与率は B-2 m でそれぞれ 86%, 14% であり, B-1 m でそれぞれ 57%, 43%, 直上水でそれぞれ 41%, 59% であった.

また, アンモニア酸化速度が大きかった 2018 年および 2019 年の 9 月に限定して AOA, AOB の平均寄与率を算出したところ, B-2 m ではそれぞれ 95%, 5%, B-1 m ではそれぞれ 68%, 32%, 直上水ではそれぞれ 41%, 59% の寄与率を示した. よって, 底層水 (B-1, 2 m) では AOA, 直上水では AOB が大きく寄与していた.

海底耕耘等による埋没生元素の海水回帰促進効果

9 月は耕耘後, 底層付近で高い栄養塩濃度が観測された. DIN (溶存無機窒素) 濃度は耕耘点直上で増加し, 西湾 (N-20) では S3 の B-1 m において $4.6 \mu\text{M}$, 東湾 (N-43) では S4 の B-1 m において $7.2 \mu\text{M}$ が最大濃度となった. この DIN の中で最も高い濃度を示したのは NO_3 で, N-20 では S3 の B-1 m において $3.6 \mu\text{M}$, N-43 では S4 の B-1 m において $7.0 \mu\text{M}$ という高い濃度を示した. また DIN 同様, NO_3 も耕耘点直上で上に凸の濃度変化を示した. DIN に占める NO_3 の寄与率は N-20 で 47% 以上, N-43 で 41% 以上となった. 一方, NH_4 は N-20 で最大 $0.3 \mu\text{M}$, N-43 で最大 $1.2 \mu\text{M}$ と NO_3 より低濃度であった. PO_4 濃度は, N-20 では S3 の B-1 m において最大 $0.7 \mu\text{M}$, N-43 では S2 の B-1 m において最大 $1.1 \mu\text{M}$ となった. SiO_2 濃度は, N-20 では S3 の B-1 m において最大 $17.0 \mu\text{M}$, N-43 では S4 の B-1 m において最大 $33.0 \mu\text{M}$ となった.

11 月は 9 月に比べ, 全体的に低い栄養塩濃度を示した. DIN 濃度は耕耘点直上で凸を示し, N-20 では S3 の B-1 m において $3.8 \mu\text{M}$, N-43 では S2 の B-1 m において $1.1 \mu\text{M}$ が最大濃度となった. DIN に占める NO_3 の寄与率は N-20 で 29.4~78.2%, N-43 で 29.6~44.7% と 9 月に比べ低い値を示した. PO_4 濃度は, N-20 では S3 の B-1 m において最大 $0.8 \mu\text{M}$, N-43 では S1 の B-1 m において最大 $0.6 \mu\text{M}$ となった. SiO_2 濃度は, N-20 では S3 の B-1 m において最大 $18.3 \mu\text{M}$ とほとんど季節差がなかったのに対し, N-43 では S5 の B-1 m において最大 $8.0 \mu\text{M}$ と 9 月に比べ落ち込んだ.

また耕耘前の値と比較すると, DIN と SiO_2 では増加傾向, DIP では一定, もしくは減少傾向を示した. 9 月は S3, S6 の B-1 m 付近で DIN が $0.0-0.9 \mu\text{M}$, SiO_2 が $0.3-4.8 \mu\text{M}$ 減少した点もあったが, その他の層では概ね増加していた. 11 月は N-20 の全採水点, 全層で, N-43 は全採水点の 40 m 以浅全てで DIN 増加を示した. 一方 DIP に関して B-1 m 層では濃度増加が見られたが, その他の層では耕耘前とほぼ同等の値を示した.

海底耕耘が栄養塩環境に与える影響

今回の現場実験で回帰効果が顕著に見られたのは NO_3 であり, ほぼ全ての季節, 地点,

観測点で正の回帰効果を示した。実際に耕耘を行うことで回帰した栄養塩を定量的に評価するため、水深 30 m～海底までの水柱内に回帰した栄養塩量の算出を行った。

11 月の総回帰量の結果から実際に耕耘が現場に与える影響について考察した。まず陸奥湾の DIN 制限に与える効果について考える。2016-2018 年の N-43 における水柱内の平均 DIN:DIP 比は 11 月に 4.5 ± 2.4 であった。また 2018 年 11 月の N-43 における耕耘前の水中内 DIN:DIP 比は 1.9 であった。今回算出した総回帰量の DIN:DIP 比は 5.0 であることから、海底耕耘は現場と同等、もしくは陸奥湾内の DIN 制限傾向を緩和させる効果が期待できる。実際の現場の水柱内栄養塩積算値と、総回帰量の算出結果を比較すると、2018 年 11 月の海底耕耘は水柱内栄養塩量の約 9%の DIN、約 3%の DIP を回帰させ、DIN:DIP 比を 5%改善すると考えることができる。また海底耕耘によって基礎生産量を短期間で増加させるには先ほど述べたとおり、9 月だと約 40 m、11 月は 25～33 m で浅まで海水が輸送される必要がある。鉛直方向への海水がほとんど輸送されなかった 9 月に対し、耕耘直後すぐに海底直上 10 m まで海水が輸送された 11 月はその後も鉛直方向へ海水が輸送されたことが予想される。つまり植物プランクトンの生長する PAR について加味すると、冬季鉛直混合が発生している 11 月の方が、海水が成層化している 9 月より耕耘が有効であると示唆された。

陸奥湾では年間を通して、DIP、 SiO_2 に比べ、DIN が不足する海域であり、有意な差は見られなかったものの 1980 年代と比較すると湾内の DIN は減少傾向にあることが示唆された。また西湾 (N-20)、東湾 (N-43) の堆積物の C:N 比は概ね 10.2 以上となっており、動植物プランクトンを主な起源とする有機物の C:N 比 6-7 の値を大きく上回る結果となった。難分解性画分が主体となる堆積物の平均 C:N 比は 10.1 であることから (日比野ら, 2008)、陸奥湾における海底耕耘では、堆積物粒子が分解することによって回帰する栄養塩の寄与は小さいことが推測された。また陸奥湾では津軽暖流水の流入が弱まり、湾内の海水滞留時間が長くなる 9 月前半から後半、11 月にかけて、冬季鉛直混合が進行し始めていた。海底耕耘を行い、湾内の生物生産性を高めるには、耕耘を行った海水が長期的に湾内にとどまり、かつ植物プランクトンの利用可能な有光層までその海水が供給される必要がある。そのため湾内の海水滞留時間が長く、鉛直的に海水が輸送される秋季から冬季が耕耘に適した季節であると思われる。

海底耕耘は比較的経費が安く、漁業者でも簡易にかつ短時間で行うことができる簡便な手法である。今後は現場の海洋生態系に著しい悪影響を及ぼさないかどうかを検討していく必要がある。耕耘前後での堆積物の酸化還元環境へ与える影響、着底トロールによる海底耕耘が底生生物に与える物理的影響などが今後考察していくべき課題となる。この課題を明らかにすることで、海の豊かさを守り、適切な管理のもと養殖事業を行うためのツールとして海底耕耘がより一層有効な手法として確立することが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 相澤明香里・工藤勲
2. 発表標題 陸奥湾における硝化活性に対するアンモニア酸化微生物の寄与とその見積
3. 学会等名 日本プランクトン学会・日本ベントス学会合同大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市村瞭、工藤勲
2. 発表標題 陸奥湾における貧栄養化対策としての海底耕耘の有効性
3. 学会等名 日本プランクトンベントス学会合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 伊藤暉・工藤勲
2. 発表標題 養殖ホタテガイの栄養塩放出が沿岸域の窒素循環に及ぼす影響
3. 学会等名 日本海洋学会
4. 発表年 2020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	芳村 毅 (YOSHIMURA Takeshi) (20371536)	北海道大学・水産科学研究院・准教授 (10101)	

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