

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510003

研究課題名(和文)二枚貝養殖を行っている内湾で顕在化した貧栄養化のメカニズム解明

研究課題名(英文) Mechanism of oligotrophication elucidated in an intensive bivalve cultured bay

研究代表者

工藤 勲 (Kudo, Isao)

北海道大学・水産科学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00195455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：持続可能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現象のメカニズム解明を目的として青森県陸奥湾において調査を行った。1970年代にホタテガイ養殖が導入された以後の40年間で栄養塩濃度は約三分の一に低下し、植物プランクトンによる基礎生産が少ない貧栄養状態が年々悪化していることが明らかとなった。これは漁獲に加えてホタテガイの糞粒が海底に堆積する量が増加し、分解されずに埋没することにより海域から窒素、リンなどの栄養塩が除去されることが要因であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Oligotrophication, decreasing trend of nutrients was examined in Mutsu bay, a semi-enclosed bay where intensive bivalve culture was carried out. Average nutrient concentration has decreased by one-third since 1970s when scallop culture was introduced to the bay. The causes for this oligotrophication were landings of scallop and the increase in deposition of scallop feces to the sediment surface, resulting in the removal of N and P from the bay.

研究分野：海洋生物地球化学

キーワード：貧栄養化 陸奥湾 ホタテガイ養殖 栄養塩 栄養塩減少傾向 持続的漁業生産

## 1. 研究開始当初の背景

ホタテガイ垂下養殖漁業は、無給餌養殖であり、海域の基礎生産による有機物をその餌源としている。ホタテガイは、漁獲物として水揚げされ、またその排泄物は糞粒として海底に埋没する。仮に過剰なホタテガイ養殖によって海域からこれまで維持されてきた物質収支が崩れている場合、窒素、リンなどの生元素の除去量が、河川、外海から供給されるこれら元素の供給量を上回り、徐々に海域の栄養塩が減少し、その結果、海域の基礎生産量が減少し、ホタテガイの餌となる有機物の減少、ホタテガイの生産量の減少という負の連鎖を引き起こす可能性が考えられる。

実際に陸奥湾の水深 20 m における窒素態栄養塩濃度は、1980 年代に  $2.52 \pm 1.33 \mu\text{M}$  であったが、2000 年代では  $0.87 \pm 0.82 \mu\text{M}$  とこの 30 年間でおよそ 7 割減少している(青森県水産増殖センター事業報告)。当然ながら窒素態栄養塩濃度は、冬に高く、夏にかけて減少する季節変動を示し、また年によりその濃度は変化するが、この報告は月一回の周年にわたる観測を毎年行っている観測結果であるため、季節及び年による変動の影響は排除されている。つまり、陸奥湾においては近年、栄養塩濃度が徐々に減少し、貧栄養化が起こっていることは明らかである。陸奥湾におけるホタテガイ生産量は 1970 年以降 1980 年にかけて急速に増加し、1980 年以降は年間 8 万トンから 12 万トンの間で推移し、今日に至っている。ホタテの窒素含有量 ( $2 \text{ mg N/gww}$ ) から年間ホタテガイとして水揚げされる窒素量を概算すると  $1.1 \sim 1.7 \times 10^7 \text{ mol}$  ( $1.6 \sim 2.4 \times 10^8 \text{ g}$ ) となる。最も栄養塩濃度が高い冬期の湾内の栄養塩の窒素総量は約  $1.3 \times 10^8 \text{ mol}$  であることから、一年間で湾内に存在する窒素態栄養塩の約 1 割に相当する窒素がホタテガイとして水揚げされている計算になる。

自然状態における湾内の窒素態栄養塩の収支を考えると、供給源としては河川水(地下水を含む)、外海水(陸奥湾の場合、津軽暖流水)が存在し、除去として堆積物への埋没、外海水への流出および脱窒として大気へ逃散が考えられる。これらの除去源に加えて、ホタテガイとして水揚げされる量とホタテガイに摂食され、未消化の有機物が糞粒として海底に沈積する量加わる。自然状態においても植物プランクトンにより生産された有機物は、一部は動物プラン

クトン等の摂食者により消費され、未消化の有機物は糞粒として、また摂食されなかった有機物は、沈降粒子として海底へと移動する。海底に輸送されたこれらの有機物は、堆積物表層と海水の境界面(海底境界層)において分解を受け、窒素、リンなどは栄養塩として水柱に回帰する。ホタテガイの有無によって、海域で生産された基礎生産物が、水柱および海底境界層における分解を免れて最終的に堆積物に埋没する量(フラックス)に相違がなければ、基礎生産から海底への除去を考慮に入れなくても良い。しかし、ホタテガイは海水中の  $5 \mu\text{m}$  以上の懸濁有機物を 90% 以上の効率で過捕食し、その糞粒中の未消化有機物はすみやかに海底に沈積し、海底境界層においても分解されにくい(MacDonald et al., 2006)。つまり、ホタテガイ養殖量が増えることにより、基礎生産物が海底に最終的に埋没するフラックスが増加している可能性が示唆される。

これまで沿岸海域における富栄養化現象については、陸域における人間活動の影響が大きい大都市に隣接した閉鎖性の強い東京湾、大阪湾、瀬戸内海などで報告されている。富栄養化により赤潮発生による漁業被害および過度な有機物生産により底層付近の溶存酸素が消費された結果、無酸素状態になり青潮発生など大きな社会問題となった経緯がある。近年では、水質汚濁に関連する法整備が行われ閉鎖性水域の富栄養化は徐々に緩和されつつあるのが現状である。本研究で着目した貧栄養化は、富栄養化の正反対の概念であり、これまであまり注目されてこなかった現象である。沿岸域における基礎生産量は、いろいろな要因により変動するが、貧栄養化が起こると基礎生産量が減少するため、その海域全体の生物生産性の低下を引き起こしかねない。本研究の研究対象である陸奥湾は暖流系の津軽暖流水の流入があるため、他の亜寒帯沿岸域と比較して栄養塩濃度は高くなかった。その陸奥湾においてこの 30 年間に栄養塩濃度が三分の一以下に減少するような貧栄養化が今後も継続すると、そこで営まれているホタテガイ養殖漁業に大きな影響を及ぼしかねない事態である。

## 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内湾で、近年海域の栄養塩濃度が減少する貧

栄養化が起きていることが明らかとなった。本研究では、持続可能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することを目的とする。具体的には青森県陸奥湾を研究海域として、(1)現在の基礎生産および関係する環境因子の測定、(2)栄養塩である窒素、リン、ケイ素等の生元素の湾全域における物質収支の見積もり、(3)堆積物の堆積速度と生元素埋没量から生元素埋没フラックスの推定を行う。堆積フラックスより基礎生産量あるいは生元素の除去量の歴史の変遷が明らかになり、現在の物質収支より貧栄養化のメカニズム解明および将来予測が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) 2012 から 2014 年度において陸奥湾全体を網羅する 14 の観測点を設定し、2~3ヶ月おきの集中観測を行った(図1)。その際、

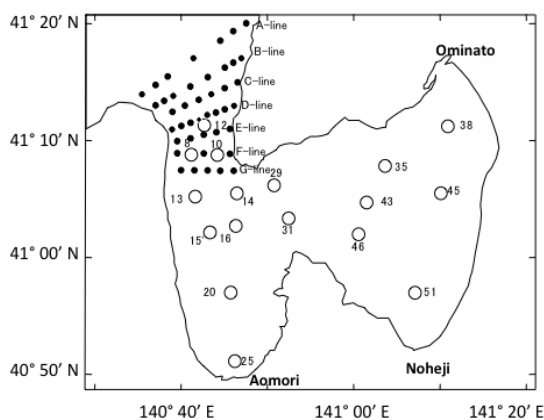


図1 陸奥湾における観測点

基礎生産量、栄養塩、溶存有機物、懸濁態有機物、窒素態栄養塩同化速度、硝化速度等を測定した。(2)同時に湾口部の断面観測を行い、外海水との海水交換を把握した。(3)2012年度に湾に流入する主要6河川について流量、栄養塩、溶存・懸濁態有機物濃度の測定を行った。(4)湾内の8観測点より不攪乱堆積物試料を採取し、海底境界層における有機物分解量、堆積物からの栄養塩フラックス、堆積物中の<sup>210</sup>Pb、生元素の鉛直分布より堆積速度、堆積フラックスを推定した。(5)ホタテガイの摂餌実験を行い、摂餌速度、消化効率および糞粒の分解性を推定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 栄養塩、クロロフィル a

東湾 St. 43 におけるアンモニウム塩(NH<sub>4</sub>)、亜硝酸塩(NO<sub>2</sub>)、硝酸塩(NO<sub>3</sub>)は、表層から 30 m までは 2011 年 11 月を除き周年にわたりほぼ枯渇状態であった。2011 年 8,9 月の 30 m 以深において NO<sub>3</sub> が増加し、最大 8 μmol L<sup>-1</sup> が観測された。2012 年 9 月に底層付近で NH<sub>4</sub> と NO<sub>3</sub> の高濃度

が観測された。リン酸塩(PO<sub>4</sub>)は、11 月を除き 0.1 μmol L<sup>-1</sup> 程度の濃度で表層から 40 m まで均一で、それ以深の底層付近で 0.4-0.6 μmol L<sup>-1</sup> まで増加した。ケイ酸(SiO<sub>2</sub>)は、5,6 月の 5 μmol L<sup>-1</sup> 程度から徐々に減少し、St.43 の 9 月には表層から 40 m まで枯渇状態となった。クロロフィル a は、2012 年 2 月と 11 月に全層で 1 μg L<sup>-1</sup> を越えたが、それ以外の時期は 1 μg L<sup>-1</sup> 以下の低濃度が観測された。陸奥湾における栄養塩濃度は、極めて低い状態が周年持続しており、2005~2007 年における報告値よりさらに減少傾向がみられ、貧栄養化が一段と進行していることが示唆された。

#### (2) 栄養塩の再生過程

夏季に栄養塩が底層付近で高濃度になっていることから、この時期活発に栄養塩が再生していることが伺えた。DIN (溶存態無機窒素:NO<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>+NH<sub>4</sub>)の再生過程である硝化の活性を表す NH<sub>4</sub> の酸化速度定数(k<sub>1</sub>)および NO<sub>2</sub> の酸化速度定数(k<sub>2</sub>)ともに 9 月に高い値を示し、活発に硝化が行われていた。それ以外の時期における酸化速度定数は、低い値が持続していた。

#### (3) 湾外水との海水交換に伴う栄養塩収支

2012 年 2 月における湾口部の水温、塩分は、湾内が低温、低塩分であった。DIN について湾外水が 5 μmol L<sup>-1</sup> 程度に対して湾内水が 1 μmol L<sup>-1</sup> 以下であり、湾外水が湾内水より高濃度であった。この時期の栄養塩は、鉛直的にほぼ均一な分布であるため、湾内水と湾外水の海水交換がどの層において行われても、栄養塩収支としては湾にとってプラスの収支となる。一方 9 月においては、塩分は湾外水、湾内水ともほぼ同じ 33.3-33.5 であるが、水温は 20 m 以深において同一深度で比べると湾内が低温であった。また、湾口部の水温の鉛直分布が湾口東側の D-8 と湾内の N-29 が類似し、湾口西側の D-1 が湾外の A-1 と類似していた。このことから、下層部において湾内水の密度が高いため、この時期の海水交換は湾外水が湾口西側の表層から流入し、湾外水が湾口東側の下層から流出していたと考えられる(逆エスチュアリー循環)。栄養塩は、表層 30 m までは湾外水、湾内水共に DIN は枯渇状態で、PO<sub>4</sub>、SiO<sub>2</sub> は、ほぼ同一の低濃度であった。一方で、30 m 以深において湾内水は湾外水より高濃度で、DIN で最大 5 μmol L<sup>-1</sup>、PO<sub>4</sub> で 0.5 μmol L<sup>-1</sup>、SiO<sub>2</sub> で 16 μmol L<sup>-1</sup> であった。湾外、湾口、湾内における水温、栄養塩の分布より、9 月では流出水中の栄養塩は流入水中より高濃度であり、栄養塩収支は、マイナスとなった。同様に他の時期についても流入水、流出水中の平均栄養塩濃度を算出した。2,11 月はいずれの栄養塩とも流入水中の

方が高濃度であるのに対して、5,9月には流出水中で高濃度であった。特に9月においてその差は顕著であった。この流出、流入栄養塩濃度に矢幅ら(2010)が推定した海水交換量を乗ずることにより月ごとの各栄養塩の流入、流出量を算出した。各栄養塩の流入量は2月~5月にかけて多く、流出量は5月~9月に多かった。流入量から流出量を引いた差分は、2月~5月までがプラス、6月~11月までがマイナスとなった。12月~1月を除いた10ヶ月間の収支は、DINは、 $-2 \times 10^7$  mol、 $PO_4$ は、 $+0.2 \times 10^6$  mol、 $SiO_2$ は、 $-23 \times 10^7$  molと $PO_4$ を除いてマイナスの収支となり、陸奥湾にとって湾外水との海水交換は、湾内の栄養塩の減少をもたらす要因となった。しかし、12-1月の値が2月と同様であると仮定すると、DINについて $0.2 \times 10^8$  mol N yr<sup>-1</sup>のプラス収支となった。

#### (4) 陸域からの栄養塩供給

陸奥湾に注ぐ主要な6河川の栄養塩濃度に流量を乗じることにより全窒素(TN)供給フラックスを算出した。河川別では、堤川が最も全窒素(TN)フラックスは多く、 $20.5 \times 10^6$  mol yr<sup>-1</sup>であった。6河川を合わせたTNフラックスは、 $35 \times 10^6$  mol yr<sup>-1</sup>となり、堤川が全体の約6割を占めた。存在形態別ではDINが全体の63%、次いでDONが29%で、PONは8%程度であった。陸域からのN供給は、河川経路に加えて、終末処理場からの供給を考慮に入れる必要がある。そこで湾に処理水を排出している7ヶ所の終末処理場(平館、新田、八重田、むつ、東通村中地区、川内、脇野沢浄化センター)からの溶存全窒素、全リン(TP)のフラックスのデータ提供を受けた(青森県県土整備部都市計画課)。その結果、青森市の新田浄化センターと八重田浄化センターからのフラックスが各処理場からの合計フラックスの87%を占めた。全ての終末処理場を合計したフラックスは、TNについて $34 \times 10^6$  mol year<sup>-1</sup>、TPについて $0.77 \times 10^6$  mol year<sup>-1</sup>となり、Nについては河川からのフラックスに匹敵する値であり、Pについては河川の約2倍の値であった。河川および終末処理場を合わせた湾へのN、P供給フラックスは、それぞれ69、 $1.2 \times 10^6$  mol year<sup>-1</sup>となった。河川および終末処理場からの供給場所は青森市に集中していることから、西湾南側から主に供給されていた。

#### (5) 堆積物への埋没フラックスの歴史的变化

陸奥湾の西湾中央のStn.20で採取した約40cmの柱状堆積物試料について過剰<sup>210</sup>Pbの分布より堆積年代と堆積速度を算出した。堆積年代として堆積表面から10cmで約1990年、20cmで約1970年、最

深層の40cmで約1810年と推定された。また、20cm近傍で堆積速度が変化していた。各層間の値から算出した堆積速度は、ここ20年で約 $0.5$  cm yr<sup>-1</sup>であり、50年前以前は $0.12$  cm yr<sup>-1</sup>でほぼ一定値を示していた。つまり、1970年代以降堆積速度は徐々に増加し、この20年は以前の約4倍の堆積速度を維持していた。

堆積物各層における有機炭素、窒素、生物起源ケイ素(BSi)濃度は、表層から下層に向け減少傾向を示した。一般に堆積物中の有機物は、堆積後初期続成作用により時間と共に徐々に分解を受け濃度が減少する。本研究では、初期続成作用による分解が一次反応によると仮定し、堆積速度が一定と考えられる他の沿岸域の堆積物から得られた分解速度定数(工藤、未発表)を用いて初期続成作用による減少分を補正し、各層における堆積初期の有機物濃度を推定した。この堆積初期の濃度に各層の堆積速度を乗ずることにより、各年代における初期堆積フラックス(mg cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>)を算出した。POC、PONの初期堆積フラックスは、1950年以前は、 $5$  mg C cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>、 $0.5$  mg N cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>でほぼ一定値を示した。しかし、近年にかけて徐々に増加し、この30年間は $30-40$  mg C cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>と $3-4$  mg N cm<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>に6-8倍増加していた。生物起源ケイ素フラックスについても約2-3倍に増加していた。

以上の結果より、1970年代にホタテガイ養殖が導入された以後の30年間で栄養塩濃度は約三分の一に低下し、植物プランクトンによる基礎生産が少ない貧栄養状態が年々悪化していることが明らかとなった。これは漁獲に加えてホタテガイの糞粒が海底に堆積する量が増加し、分解されずに埋没することにより海域から窒素、リンなどの栄養塩が除去されることが要因であることを明らかにした。陸奥湾において栄養塩濃度が極めて低い現状は、基礎生産の矮小化を引き起こし、基礎生産力に依存しているホタテガイ養殖漁業に深刻な影響を与えることが危惧される。

#### 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3件)

- 1) 工藤 勲, 吉村 真理, 橋岡 香織, 足立 敏成, 磯田 豊 (2014) 陸奥湾における貧栄養化と二枚貝養殖の関連性. *沿岸海洋研究*, 52, 83-92. 査読有
- 2) 河野 航平, 磯田 豊, 工藤 勲, 藤原 将平, 有田 駿, 小林 直人, 吉田 達,

扇田 いずみ,高津 哲也(2014)陸奥湾の逆エスチャリー循環流-(1)夏季の湾口海洋観測-. 海と空, 90, 11-16. 査読有

- 3) 河野 航平,磯田 豊,工藤 勲,吉田 達,扇田 いずみ,小林 直人(2014)陸奥湾の逆エスチャリー循環流-(2)数値モデル実験-. 海と空, 90, 17-25. 査読有

[学会発表](計7件)

- 1) 足立 敏成,橋岡 香織,工藤 勲 陸奥湾における基礎生産に占める暗所炭素取り込みの定量化 日本海洋学会秋季大会,2014年9月15日,長崎大学(長崎県長崎市)
- 2) 工藤 勲,吉村 真理,橋岡 香織,足立 敏成,磯田 豊 陸奥湾において顕在化した貧栄養化とその要因 日本海洋学会春季大会 2014年3月29日,東京海洋大学(東京都港区)
- 3) 河野 航平,磯田 豊,工藤 勲,吉田 達,扇田 いずみ 陸奥湾における逆エスチャリー循環流の季節変化 日本海洋学会秋季大会 2013年9月20日,北海道大学(北海道札幌市)
- 4) 工藤 勲 陸奥湾における貧栄養化と二枚貝養殖の関連性 日本海洋学会秋季大会 沿岸海洋研究シンポジウム 2013年9月17日,北海道大学(北海道札幌市)
- 5) 吉村 真理,横内 佑都美,工藤 勲 陸奥湾における堆積物中の生元素埋没量の歴史的変遷 日本海洋学会春季大会,2013年3月23日,東京海洋大学(東京都港区)
- 6) 吉村 真理,橋岡 香織,工藤 勲 陸奥湾における堆積物中の生元素動態に基づく生物生産過程の評価 日本海洋学会秋季大会,2012年9月14日,東海大学(静岡県静岡市)
- 7) 橋岡 香織,堤 正純,吉村 真理,小島 久弥,福井 学,工藤 勲 陸奥湾底層における硝化速度とアンモニア酸化生物群集の関連性 日本海洋学会秋季大会,2012年9月14日,東海大学(静岡県静岡市)

[産業財産権]  
該当無し

[その他]  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

工藤 勲 (KUDO Isao)  
北海道大学・大学院水産科学研究院・  
准教授  
研究者番号:00195455

### (2) 研究分担者

磯田 豊 (ISODA Yutaka)  
北海道大学・大学院水産科学研究院・  
准教授  
研究者番号:10193393