

秋田県八郎湖における二枚貝イシガイと生息環境の相互関係

秋田県立大学 生物資源科学部

藤林 恵 吉田 亨
岡野 邦宏 宮田 直幸

1. はじめに

八郎潟残存湖（以下、八郎湖）は秋田市の北方約20 kmに位置し、東部承水路、西部承水路、そして八郎潟調整池の3つの水域を有する（高野, 2016）、総面積47.3 km²、平均水深2.8 mの浅い淡水湖沼である。八郎湖では流域や周辺地域からの栄養塩負荷によって富栄養化が進行し、夏季には *Anabaena* 属や *Microcystis* 属に代表される藍藻類が異常増殖し、湖面を緑色に染める現象、いわゆるアオコが観測され、問題となっている。平成19年には湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼に指定され、秋田県では、湖沼水質保全計画に基づき、八郎湖の水質改善に取り組んでいる。

湖沼水質保全計画における湖内水質浄化対策事業の一つとして、シジミ等二枚貝類を用いた湖内での水質浄化試験が検討されてきた。シジミ類のような二枚貝は水をろ過し、水中の懸濁物質をこしとって餌を獲得する、ろ過摂食機能を有している。このプロセスによって水中の懸濁物質濃度は減少し、アオコの抑制や透明度向上による沈水植物の回復などが見込まれる。シジミ類は水産資源としての価値も高く、アオコを含む湖内の懸濁物質をろ過摂食したシジミ類を漁獲することで、湖内からの窒素・リンの系外排出も期待された。しかし、八郎湖に生息するセタシジミやヤマトシジミは、生息密度が低く、期待されるような水質浄化効果を得ることは難しい。また、シジミ類の漁獲量も0.3 ton year⁻¹と少ない水準で推移している（杉山, 2016）。

ヤマトシジミは淡水環境では再生産できないため、稚貝の放流も行われているが、定着・増産には至っていない。その原因の一つとして、大型底生魚類による食害があげられる（高野, 2016）。これまでの放流試験でも、砕かれた二枚貝の殻が頻繁に観察されている。また、八郎湖底質の泥質化の進行もシジミ類の定着を妨げていると考えられる。一般に、泥質化が進行すると、シジミ類の個体数は減少することが知られており、泥質化が進

行した八郎湖はシジミ類の生息に適さない可能性が高い。ヤマトシジミの場合、成貝ではシルト含有率54%以下、強熱減量8%以下、稚貝ではシルト含有率5%以下、強熱減量3%以下が生育可能な底質条件と考えられている（山崎ら, 2008）。荒木ら（未発表）の調査によると、八郎潟調整池において強熱減量が3%以下のエリアは南部の沿岸域などに限られており、シジミ類の定着・増産に不利な状況にあることが伺える。

その一方で、八郎湖では、シジミ類の生息が確認されない、泥質化が進んでいる地点からでもイシガイ科二枚貝であるイシガイ (*Unio douglasiae*) が採取されており、イシガイはシジミ類に比べて泥質への耐性が高いと考えられる。また、イシガイに含まれる藍藻由来の脂肪酸含有率は同一地点に生息するマシジミよりも高く（藤林ら, 未発表）、シジミ類よりも効率的に藍藻を餌として利用している可能性が高い。これらの点から、八郎湖においてはシジミ類のみならずイシガイについても注目し、検討を加えることが有効であると考えられる。しかし、八郎湖においてイシガイの生態や水質浄化能力について調べた事例は見当たらず、不明な点が多い。

他方、二枚貝は水中の懸濁物質をろ過し、未消化の有機物を偽糞として体外に排出するが、この偽糞が底質環境中に排出され、底質有機物増加の原因となっている（Tokumon et al., 2018）。有機物の増加は貧酸素化などの環境悪化の原因となる可能性がある。すなわち、二枚貝の生息に不利な底質の泥質化を自身で引き起こす可能性がある。そのため、二枚貝類の定着を実現させ、水質浄化手法として持続的に利用するためには、イシガイの水質浄化効果のみならず、底質環境に与える影響や、その底質環境の変化がイシガイに与える影響についても検討する必要がある。

そこで本研究は、八郎湖における①イシガイによる浮遊藻類除去能力の評価、②イシガイの生息が底質の有機物量に与える影響の評価、③底質が

イシガイに与える影響を明らかにすることを目的とした。秋田県八郎湖内に食害防止策を施したメソコスムを設置し、有機物含有量の異なる底質を敷いた上でイシガイを投入して、メソコスム内の水質・底質の変化およびイシガイの肥満度や生残率をモニタリングした。

2. 方 法

1) メソコスム試験の概要

秋田県八郎湖東部承水路・夜叉袋の消波工内（秋田県施設、夜叉袋消波工No.2）で試験を行った。この消波工内は岸から石積みでL字型に囲まれた長方形の区画であり、岸から見て右側の1辺は湖沼に開いている（図1）。底質は砂質となっている。

2017年7月下旬に消波工内に円形のメソコスム（使用材質：ポチエチレン板、高さ：40 cm、直径：76.4 cm、面積：0.458 m²）を4つ設置した（図2）。メソコスム底部および上部は筒抜けとなっており、メソコスム底部は直接消波工内の砂質となる。実験期間中、水の交換が起きないように、メソコスムの上端は水面より高くなるように設置した。4つのメソコスムのうち、2つを砂質系、残りの2つを泥質系とした。砂質系のメソコスムは消波工の底質をそのまま利用した。一方、泥質系には有機物含有量が高く、二枚貝の生息が確認されなかった八郎湖湖心部付近の底泥を採取し、深さ8 cm程度になるように敷き詰めた。

メソコスムの設置から1週間後、メソコスム内の底泥の巻き上げが収まったのを確認し、砂質系、泥質系のメソコスム1つずつに対して、個体サイズが同等のイシガイをそれぞれ23、21個体ずつ投入した。投入したイシガイは個体識別ができるように、事前に殻にペンキで番号を付した。イシガイを投入しなかったメソコスムは対照系とした。なお、メソコスムの上部には大型魚類の飛び込みによる侵入や、鳥類の食害を防ぐために金網（約3 cmメッシュ）をかぶせた。

イシガイを投入した8月初旬を実験開始日として、月に1回あるいは2回のサンプリングおよび多項目水質計（Hydrolab DSS、環境システム株式会社）によるモニタリングを11月下旬まで行った。多項目水質計では、底質直上のクロロフィルa濃度、溶存酸素濃度を測定した。また、メソコスム内の水、底質、およびイシガイを採取した。水は



図1 メソコスム実験を行った消波工の様子



図2 消波工内に設置されたメソコスム

500 mlのポリ瓶で中層から直接採取し、底質はクワを用いて表層1 cm程度の底泥を採取した。イシガイは多項目水質計による観測や水、底質採取後に、メソコスム内の全個体を手探りで採取し、死亡個体数を記録し、各個体の殻長、殻高、殻幅を現地でノギスで計測した。脂肪酸分析、肥満度、生殖腺指数を測定するために、殻長が同等な3個体を選び、それ以外の個体はメソコスムに戻した。

多項目水質計による観測、水および底質試料の採取、イシガイサイズの記録は各調査時に、分析用のイシガイの採取は試験開始時と9月下旬、試験終了時の3回実施した。

2) 分析項目

懸濁物質、底質、イシガイの脂肪酸組成を分析した。懸濁物質は水試料をガラス繊維ろ紙（Whatman、GF/F）でろ過し、凍結乾燥後、懸濁物質が付着した表面を分析に供試した。底質は凍結乾燥した後、約200 mgを分析に用いた。イシガイは軟体部を取り出し凍結乾燥した後、筋肉部約50 mgを分析に用いた。

脂肪酸の抽出、誘導体化は One step method (Abdulkadir & Tsuchiya, 2008) を用いた。まず、凍結乾燥した各試料をねじ口試験管に入れ、内部標準液 1 ml (トリコサン酸 10 mg をヘキサン 100 ml で定容したもの)、ヘキサン 1 ml、三フッ化ホウ素メタノール 0.8 ml を加えた後、試験管に窒素ガスを充てんし、100℃ のウォーターバス内で 2 時間加熱した。放冷後、ヘキサン 0.5 ml、超純水 1 ml 加え、1 分間手で激しく振とうした後、約 5 分間、2500 rpm の条件で遠心分離した。脂肪酸メチルエステルを含む上澄みをガスクロ用のバイアル瓶に移し、キャピラリーカラム (Agilent 社, Select FAME, 0.25 mm, 100 m) を装填したガスクロマトグラフ (サーモフィッシャーサイエンティフィック社, TraceGC) で分析した。ガスクロマトグラフの運転条件および、脂肪酸の同定・定量は藤林ら (2014) の方法を用いた。なお、本研究は緑藻・藍藻由来の脂肪酸としてリノール酸 (18: 2 ω 6)、リノレン酸 (18: 3 ω 3)、珪藻由来の脂肪酸としてエイコサペンタエン酸 (20: 5 ω 3) に特に注目して解析を行った (Fujibayashi et al., 2018)。

凍結乾燥させた底質試料を対象として、炭素含有量を分析した。砂質では約 50 mg、泥質では約 20 mg をそれぞれ錫カップにいれ、元素分析装置 (サーモフィッシャーサイエンティフィック社, Flash 2000) で分析した。

イシガイの肥満度は、脂肪酸分析を行ったイシガイを対象として、下記の式で算出した。

$$\text{肥満度 (mg mm}^{-3}\text{)} = \text{軟体部乾燥重量 (mg)} / [\text{殻長 (mm)} \times \text{殻高 (mm)} \times \text{殻幅 (mm)}]$$

3. 結果

1) 水中のクロロフィル a 濃度および溶存酸素濃度

各系のクロロフィル a 濃度の初期値はばらつきがあり、泥質のイシガイ系で 14 $\mu\text{g l}^{-1}$ と最も高く、泥質の対照系で 8 $\mu\text{g l}^{-1}$ と最も低かった (図 3)。試験開始直後の 8 月下旬に砂質、泥質ともにイシガイ系のメソコスムでクロロフィル a 濃度が減少し、その後も 4 $\mu\text{g l}^{-1}$ 前後を維持した。一方で、砂質、泥質ともに貝のいない対照系では試験期間を通して 10 $\mu\text{g l}^{-1}$ を超える傾向にあり、最終日には、砂質で 12 $\mu\text{g l}^{-1}$ 、泥質で 14 $\mu\text{g l}^{-1}$ となった。イシガイ系において、試験期間を通して対照系に対して、

砂質では平均 62%、泥質では平均 65% の減少が見られたが、泥質と砂質による相違は認められなかった。また、イシガイの存在によるクロロフィル a の低下は目視でも確認できた。

底質直上の溶存酸素飽和度は砂質、泥質や貝の有無に関わらず、試験期間を通して 100% を超えていた (図 4)。貝なし・泥に関しては、8 月下旬以降は 140% 以上、貝あり・泥でも概ね 120% 以上を維持しており、砂質系よりもやや高い傾向にあった。

2) 底質の有機炭素含有量

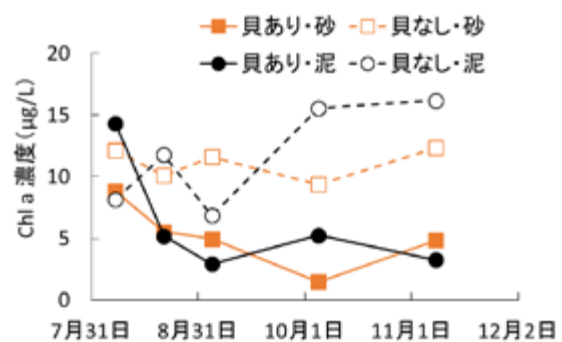


図 3 試験期間中における各メソコスム内のクロロフィル a 濃度の経時変化

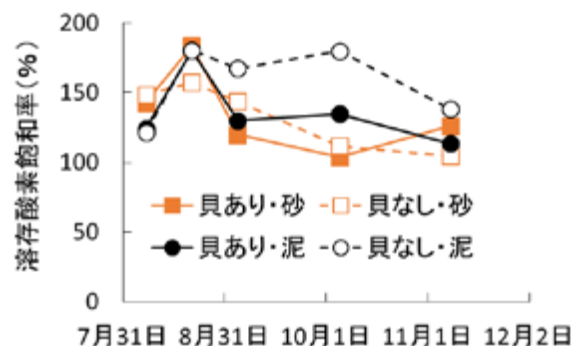


図 4 各メソコスム底層における溶存酸素飽和率の経時変化

初期の底質の有機炭素含有量は砂質で約 0.4%、泥質で 2.3% であり (図 5) 泥質系が砂質系より約 6 倍高い値となった。実験開始後、全てのメソコスムで底質の有機炭素含量が増加したが、砂質、泥質ともにイシガイの有無による有機炭素含有量の違いは見られなかった。ただし、10 月のサンプリングでは砂質のイシガイ系において 4.1% と対照系の 2.2% と比較して高い値が観測された。11 月にはイシガイ系、対照系でそれぞれ 0.8、0.6% とほぼ同等の値となった。

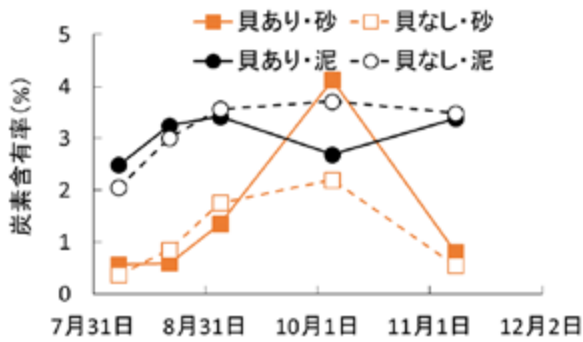


図5 各メソコスムにおける底質中の有機炭素含有率の経時変化

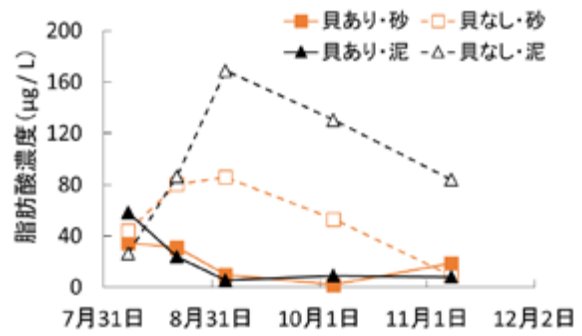


図6 各メソコスムにおける懸濁物質中の緑藻・藍藻由来脂肪酸含有量の経時変化

3) 脂肪酸組成

水中懸濁物中の緑藻・藍藻由来の脂肪酸量は泥質のイシガイ系で初期条件が約 $60 \mu\text{g l}^{-1}$ とクロロフィル a 濃度と同様に、ほかの系と比べて高い傾向にあった (図 6)。砂質、泥質ともにイシガイ系では試験開始から脂肪酸量の減少が見られ、9月以降は $10\sim 20 \mu\text{g l}^{-1}$ を維持した。一方、砂質、泥質ともに対照系で脂肪酸量の増加が見られ、特に、泥質では9月初旬に $160 \mu\text{g l}^{-1}$ まで増加した。9月以降は減少し、11月には砂質で $20 \mu\text{g l}^{-1}$ 、泥質で $90 \mu\text{g l}^{-1}$ まで減少した。

底質の緑藻・藍藻由来の脂肪酸量は、砂質では、試験期間を通じて $20 \mu\text{g g}^{-1}$ 程度で推移していたが、10月にイシガイ系で $100 \mu\text{g g}^{-1}$ まで急激に増加した (図 7)。泥質では対照系・イシガイ系ともに藍藻・緑藻由来の脂肪酸量が9月まで増加した後、10月に一度低下し、11月に再度増加した。砂質系の10月を除き、イシガイの有無で緑藻・藍藻由来脂肪酸量に大きな差はなかった。

イシガイに含まれる緑藻・藍藻由来の脂肪酸含有率は、実験初期では3.2%であったが、実験終了時は砂質系、泥質系でそれぞれ4.4、4.1%まで増加した。ただし、砂質系と泥質系で有意差はなかった (t検定、 $p > 0.05$) (図 8)。

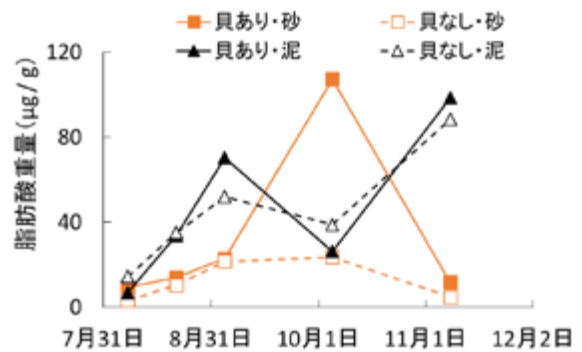


図7 各メソコスムにおける底質中の緑藻・藍藻由来脂肪酸含有量の経時変化

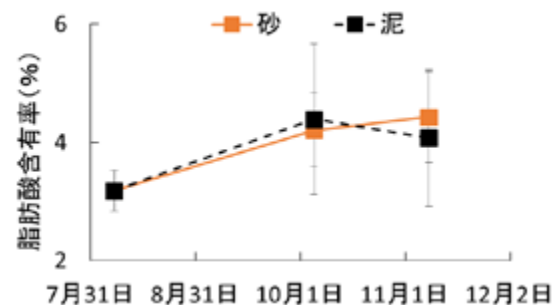


図8 イシガイ体内の緑藻・藍藻由来脂肪酸含有率の経時変化

4) イシガイの生存個体数・肥満度

イシガイの生存個体数は、投入時、脂肪酸分析個体を除くと、砂質、泥質それぞれ16、14個体だったのが試験終了時は砂質、泥質それぞれ12、11個体になった (図 9)。肥満度は試験開始時と比べて終了時には砂質で24%、泥質で30%の減少が見られた (図 9)。生存個体数、肥満度ともに泥質系と砂質系間でほぼ同等の値で推移していた。

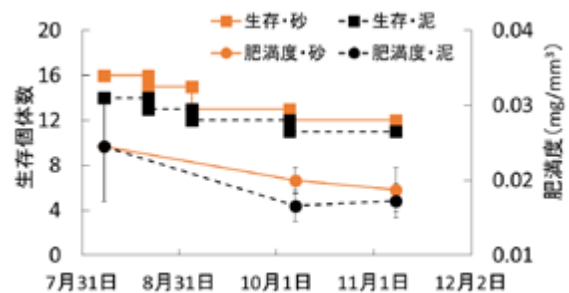


図9 イシガイの生存個体数および肥満度の推移

4. 考 察

1) イシガイの浮遊藻類除去能力の評価

これまで、イシガイ科二枚貝の水質浄化能力については室内飼育環境下で半日程度の短時間の試験結果から整理されてきており、イシガイ科二枚貝が水中の懸濁物質を除去できることが示されている(川瀬, 2010, Kawase & Yagi, 2010)。本研究では、イシガイを放流した野外メソコスムにおいて水中のクロロフィル a や緑藻・藍藻由来の脂肪酸濃度が低下したことから、イシガイのろ過作用が野外環境においても発揮されることが示された。また、2ヶ月以上におよぶ試験期間中、イシガイによる水質浄化作用が持続することも合わせて明らかとなった。野外環境中では、水中に様々なサイズや種類の粒子が含まれ、日々変動していく。また、風によるかく乱、水温、溶存酸素濃度などの物理・化学条件も昼夜あるいは日々の天候に応じて変動する。その様な条件下でも、水質浄化効果が維持されたことは、今後イシガイを水質浄化手法として八郎湖で活用していく上で重要な知見である。

また、イシガイによる水質浄化効果は泥質や砂質といった異なる底質条件においても同等であった。泥質化が進行し、粒径が細くなるとエラの閉塞などが生じ、ろ過効率が低下することが報告されている (Aldridge et al., 1987)。しかし、イシガイは八郎湖の泥質化が進行し、有機炭素含有率が2.3%程度の状況下でも、ろ過効率が低下しないことが明らかになった。

イシガイは食用とされないため、漁獲による窒素・リンの系外排出効果は見込みにくい。しかし、泥質環境下においても持続的に藻類の増殖を抑える効果があることから、生息密度が増加すれば八郎湖の水質改善に寄与すると考えられ、今後はシジミ類のみならずイシガイにも注目していくことが有効である。

2) イシガイが底質に与える影響

試験期間中、全てのメソコスムにおいて9月まで底質の有機炭素含量が増加した。対照系でも増加していたこと、そしてイシガイの有無で差が見られなかったことから、底質の有機炭素含有率の増加はメソコスム内の懸濁物質の自然沈降によるものと推察される。二枚貝はろ過摂食により取り込んだ懸濁粒子のうち、餌として利用できないものや過剰に取り込んだものは偽糞として排出する。そのことが底質環境の悪化を引き起こすが、本研究期間においてそのような現象は見られな

かった。イシガイ体内の緑藻・藍藻由来脂肪酸含有率が試験期間中に増加傾向にあったことから、イシガイによって取り込まれた緑藻や藍藻などの藻類は偽糞として底質に輸送されるよりも、体内で餌として同化されていたと考えられる。

イシガイが餌として利用可能な藻類が水中に懸濁している際に、イシガイに取り込まれた藻類が、偽糞として底質に輸送されるかどうかは、イシガイが同化可能な藻類量(需要量)と、水中の藻類量(供給量)とのバランスで決定しているはずである。本研究では、メソコスムにより外界と隔離したために、移流は生じず、メソコスム内での一次生産のみが藻類の供給源であったために、イシガイの同化可能な藻類量に対して、供給される藻類量が過剰にならなかった可能性も考えられる。そのため、今後はイシガイの摂食・同化・排泄にともなう炭素収支も明らかにすることで、イシガイの底質有機物に与える影響を定量的に評価していくことが重要である。

ところで、イシガイを放流した砂質系において、10月に底質の有機炭素含有率が著しく増加した。これは当該メソコスムにおいて糸状性の緑藻類が大量発生していたことから、これら藻体の有機炭素が含まれたためと考えられる。イシガイのろ過作用により、透明度が向上しており、底質表面に光が届きやすくなったことで、これらの糸状性緑藻類が優占したものと考えられる。

3) イシガイが受ける底質細粒子からの影響

泥質化が進行した環境下で二枚貝類の定着が阻害される原因については複数の機構が想定されている。例えば、有機物を多く含む底泥が細菌類などにより分解される際に酸素が消費されるため、底質付近の溶存酸素濃度が低下し、二枚貝の成育に悪影響を与える (Nalepa et al., 1991) 可能性が挙げられる。また、有機物が増加すると栄養塩類の溶出も増加することが考えられるが、アンモニア濃度が 5 mg l^{-1} の条件において溶存酸素が十分でも試験個体の約4割が死滅したと報告されている (Horne & McIntosh, 1979)。このような生理学的な影響のほか、泥質化が進行した細粒子が鰓や水管に詰まることによる、ろ過摂食障害や成長速度の低下といった物理的な影響も想定されている (Lummer et al., 2016)。

しかし、本研究では砂質と泥質でイシガイの生残個体数や肥満度に差が見られなかった。また、泥質環境下でも砂質系のメソコスムと同等の水質

浄化効果が観測されたことから、泥質系においてもイシガイがろ過摂食を継続的に行っていたことが示されている。これらの結果は本実験条件下では、イシガイが泥質から悪影響を受けていなかったことを示している。

一方で、今回用いたメソコスムでは水深が数十cmと浅く、底層まで酸素が十分に供給されていたため、実際の湖沼であれば泥質化とともに起こる、貧酸素化やそれとともに栄養塩の溶出が起きていなかったと考えられる。そのため、本試験結果において認められたイシガイの泥質に対する耐性は、細粒子がイシガイに与える物理的な影響に対する耐性と解釈することが妥当であろう。そのため、貧酸素化が起きている八郎湖の泥質場にイシガイを放流しても、健全なる過活動が行われるか、本研究からは推定することが難しい。しかしながら、貧酸素化が起これにくい泥質場であれば、イシガイによる水質浄化が期待される。例えば、八郎湖では高濃度酸素水を供給する取り組みを行っているが、このような生息場では、覆砂や浚渫をして底質改善をしなくとも、イシガイを放流していくことで水質浄化作用が発揮されると期待される。

5. まとめと今後の展望

本研究によって、イシガイは底質の種類によらず、八郎湖において継続的に水質浄化能力を発揮することが明らかとなった。また、本実験条件下においては、ろ過摂食した緑藻や藍藻などの懸濁物質を餌として同化し、底質の有機汚濁を引き起こさないことが明らかとなった。そして、二枚貝の生息に不利とされる泥質化が進行した底質においても、生残率や肥満度を低下させないことも合わせて明らかとなった。これらの知見は、アオコの発生が問題となり、また泥質化が進行している八郎湖においてイシガイを用いた水質浄化手法適用の有効性を示すものである。現状、八郎湖におけるイシガイの生息密度は低い。今後は、イシガイの生息密度や生息域拡大に向けた調査・研究を進めていくことで、八郎湖の水質改善につながっていくことが期待される。

謝 辞

本研究で試験を行った夜叉袋消波工No.2の利用にあたっては、秋田県生活環境部環境管理課八郎湖環境対策室より許可を頂いた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- Abdulkadir, S. and Tsuchiya M. (2008) One-step method for quantitative and qualitative analysis of fatty acids in marine animal samples, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 354, 1-8.
- Aldridge, D.W., Payne B. S., Miller A. C. (1987) The effects of intermittent exposure to suspended solids and turbulence on three species of freshwater mussels, *Environmental Pollution*, 45, 17-28.
- Horne, R. F. & McIntosh S. (1979) Factors influencing distribution of mussels in the Blanco River of Texas, *The Nautilus*, 94(4) , 119-133.
- Fujibayashi, M., Okano K., Takada Y., Mizutani H., Uchida N., Nishimura O., Miyata N. (2018) Transfer of cyano-bacterial carbon to a higher trophic-level fish community in a eutrophic lake food web: fatty acid and stable isotope analyses, *Oecologia*, 188, 901-912.
- 藤林恵, 長田祐輝, 相川良雄, 西村修 (2014) 炭素安定同位体比および脂肪酸バイオマーカーを用いたマルタニシの餌源の解明, 土木学会論文集G (環境), 70(7), III_413-III_418.
- 川瀬基弘 (2010) 日本産イシガイ類による炭素・窒素除去, 陸の水, 43, 71-81.
- Kawase, M. & Yagi A. (2010) Water purification abilities of eight Japanese Unionoida, *Proceedings of the 14th International Symposium on River and Lake Environments (ISRLE2009)*, 13-27.
- Lummer, E. M., Auerswald K., Geist J. (2016) Fine sediment as environmental stressor affecting freshwater mussel behavior and ecosystem services, *Science of The Total Environment*, 571, 1340-1348.
- Nalepa, T. F., Manny B. A., Roth J. C., Mozley S. C., Schloesser D. W. (1991) Long-term decline in freshwater mussels (Bivalvia: Unionidae) of the western basin of Lake Erie, *Journal of Great Lakes Research*, 17, 214-219.
- 杉山秀樹 (2016) 八郎潟の干拓にともなう漁業資源の変遷, 水環境学会誌, 39(A) (7), 234-237.
- 高野尚紀 (2016) 八郎湖における水質保全対策の取り組み, 水環境学会誌, 39(A) (7), 238-241.
- Tokumon, R., Boltovskoy D., Cataldo D. (2018) Effects of the invasive fresh-water mussel *Limnoperna fortunei* on sediment properties and accumulation rates, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123, 2002-2017.
- 山崎幸夫, 須能紀之, 根本隆夫 (2008) 涸沼におけるヤマトシジミ稚貝の分布と底質環境, 茨城内水面試験場研究報告, 41, 25-31.