

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05112

研究課題名(和文) バイカル湖における富栄養化にともなう生態系変質リスクの検証

研究課題名(英文) Verification of ecosystem alteration risk caused by eutrophication at Lake Baikal

研究代表者

山室 真澄 (Yamamuro, Masumi)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80344208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：貧栄養湖沼のバイカル湖では、近年、沿岸域での大型底生緑藻の異常繁茂や共生海綿の死滅などの異変が生じている。本研究ではその原因として、下水起源の間隙水の富栄養化であることを示した。また沿岸域にはプラスチックゴミを含む大量のゴミが集積していたことから、マイクロプラスチックの調査を行った。大型底生緑藻の異常繁茂は、補食されれば軽減されるはずである。本研究では異常繁茂する大型底生緑藻は硫化水素を発生することで捕食を免れていると推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

湖水が貧栄養で維持されているバイカル湖では、共生海綿の衰退や大型底生緑藻の異常繁茂の原因は温暖化であると考えられていた。本研究により原因は未処理の下水の増加による、湖岸間隙水の富栄養化であることが明らかになったことから、ロシア政府は、新たに下水処理システムを造設する方針を固めた。大型底生緑藻の異常繁茂は沿岸域や北米の五大湖などでもかねてから問題になっており、原因はリンの増加と考えられている。本研究では補食者が大量死していることから、捕食を免れる機構を備えていることも異常繁茂の原因であることを、世界で初めて指摘した。

研究成果の概要(英文)：Lake Baikal is an oligotrophic lake and catastrophic change of ecosystem (i.e. bloom of benthic green algae and die off of symbiotic sponges) proceeds recently. This study showed that the change is induced by eutrophication in interstitial water at splash zone originated from sewage. As we found the pile of garbage including various plastics at the coast of Lake Baikal, we conducted sampling of micro plastics. The amount of benthic green algae should decrease if grazer exists. We assume that benthic green algae defend against grazer through producing hydrogen sulfide.

研究分野：生物地球化学

キーワード：バイカル湖 富栄養化 沿岸域 大型底生緑藻 マイクロプラスチック 下水 間隙水 リン

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

1. 研究開始当初の背景

バイカル湖は北緯 51 度、東経 103 度に位置する世界最深 (最大深度: 1643m) の貧栄養淡水湖沼で、その水量は地球の淡水湖全体の約 17% を占める。バイカル湖は約 3000 万年前に形成された古代湖であり、生物学的に孤立した生態系として維持されてきた。そのため独自の進化・分化を経て千数百種に上る固有種を擁するに至った。バイカル湖の生物は分類学の観点からは詳細な研究が為されており、原生動物を除いて約 365 属 1334 種が生息し、その約 70% が固有種である。特に甲殻類のヨコエビ類は、地球上の淡水ヨコエビ類約 1000 種の 3 分の 1 に相当する 259 種が生息し、うち 98% がバイカル湖固有種である。バイカル湖では魚類を対象とした水産業が発達しているが、ヨコエビ類は魚類の餌として重要な位置を占めると考えられている。

バイカル湖同様に貧栄養水域でありながら、多様な生物相によって安定した系が保たれている生態系として、サンゴ礁生態系がある。サンゴ礁では造礁サンゴと呼ばれる、共生藻を有するサンゴが生態系の基盤となる礁地形を作ることによって多種多様な生物の生息を可能にしている。研究代表者が世界で初めてサンゴ礁域で行った窒素安定同位体比を用いた研究によって、従来は栄養物質を系内で循環させていると考えられていたサンゴ礁生態系では、サンゴの骨格やサンゴ砂、またサンゴ以外の動物に窒素固定能を有する微生物が共生しており、その窒素固定によって貧栄養海域でありながら高い生産を維持していることが明らかになった (Yamamuro et al. 1995)。

バイカル湖では *Lubomirskia baicalensis* などの海綿類が共生藻を有しており、水深 2~40m において水中林のようなコロニーを形成している。海綿類には多種のヨコエビ類が生息しており、共生海綿類がサンゴ礁のように多種多様な生物に生息空間を提供しているだけでなく、溶存有機物などの形で餌資源も供給している可能性もある。バイカル湖の海綿類については、動物としての海綿が濾過食によって取り込む炭素量などが特定の種について調べられているが、栄養塩循環の観点からの検討や、共生藻が果たす役割については全く検討されていない。またヨコエビ類と共生海綿類との関係についても検討されていなかった。

近年、多くのサンゴ礁で富栄養化が進行した結果、植物プランクトンや大型緑藻などが増加し造礁サンゴが減少している。高度に貧栄養なバイカル湖においても北部の流入河川を中心に富栄養化が進んでいる可能性が指摘されており、サンゴ礁同様、貧栄養環境に適応した海綿を中心とした生態系が変質する危険があった。

2. 研究の目的

バイカル湖生態系については、1990 年代に日本人研究者のグループが炭素・窒素安定同位体比分析を行い、沖合生態系に関して報告されているものの (例えば Yoshii et al. 1999) 底生系のデータは未解析であった。一般に植物プランクトンの炭素安定同位体比は、無機炭素源が同じであれば、富栄養化によって生産速度が高くなると重い値にシフトする。また窒素安定同位体比は食物連鎖の段階や、栄養源によって値が増減することが知られている。特に貧栄養海域では、無機態窒素濃度が通常の分析では検出限界未満であっても、その富栄養化の進行状況を一次生産者の窒素安定同位体比から推定できることが、研究代表者らの熱帯藻場での研究から明らかになっている (Yamamuro et al. 2003)。このことから、1990 年代に行われた調査と



同じ場所で植物プランクトンや水草類の炭素・窒素安定同位体比を現在と比較することで、富栄養化が進行しているかを確認することができる。また現在のバイカル湖の汚濁が流入する場所とそうでない場所で同種の安定同位体比を比較することで、富栄養化の進行度の違いを検証することも可能である。

そこで本研究では 1990 年代の調査に関わったロシア側研究者と共同研究を行うことで、まだ公開されていない 1990 年代のデータを参照しつつ、汚濁が進んでいる可能性がある水域と進んでいない水域の典型的な箇所を抽出して集中的にサンプリングを行い、炭素・窒素安定同位体比を指標にバイカル湖での汚濁進行の有無やその影響を明らかにすることを当初目的として研究を開始した。

開始した年である 2014 年 7 月に研究代表者が現地に行って、共同研究者とともに共生海綿を含めてサンプリングを行った。予測どおり多種多様なヨコエビ類が共生海綿と同所的に生息していた (図 1)。

ところが帰国してすぐの 9 月に、研究代表者がサンプリングを行った地点も含めて、共生海綿がバイカル湖の広範囲で死滅する異変が発生した。またかねてから富栄養化の兆候とされていた大型底生緑藻の異常繁茂の量と範囲が急激に拡大し、繁茂域で底生動物が大量死する状況に至った (図 2)。

図 1 共生海綿とヨコエビ類 リンの増加に対応して増える傾向があるラン藻類が共生海綿に付着していたことや、緑藻類の繁茂も富栄養化が原因と考えられるものの、湖水の定期モニ

タリングでは富栄養化の兆候は全く無く、ロシア国内では異変の原因として温暖化を説く者が多かった。

これに対して研究代表者と共同研究者は、底生緑藻は間隙水が富栄養化することで増殖できること、また大量死は海綿や腹足類など底生動物に限定され魚類には影響がないことから、底生系の富栄養化が原因と仮定して、それを証明することに研究目的を変更した。また、図2にみられるように好氣的と考えられる環境で腹足類が大量死していたことから、酸欠以外の原因を文献調査によって推定した。さらに、世界自然遺産に指定されたバイカル湖では観光客の増加に伴いゴミの違法投棄も増え、一部はマイクロプラスチック化している可能性があったため、沖合でのマイクロプラスチック調査も追加した。



図2 Spirogyra 属底生緑藻マット上で斃死した Radix 属腹足類

3. 研究の方法

1) バイカル湖間隙水の富栄養化

間隙水を大量に採集するのは困難であるため、おおよその濃度を推定するために、数 ml のサンプルでその場で分析できるパックテストを日本から持参して、硝酸、アンモニア、リン酸態リンの分析を現場で行った。その結果、多くの地点で非常に高濃度であることが分かったため、共同研究者の同僚が別途間隙水の分析を行い、正確な濃度を確定した。

1990年代に日本人研究者のグループが分析した一次生産者の窒素安定同位体比を現在の同じ場所・同じ生物種で比較することで富栄養化の進行を証明することができると考え、1990年代に分析を担当した研究者の消息を調べ、データの引き継ぎと使用許可を得た上で未公表資料の整理を試みた。窒素安定同位体比が富栄養化を反映していることを示すためには、現在のバイカル湖で間隙水の栄養塩濃度が高いところと低いところとで同一種の窒素同位体比を比較する必要がある。このため、栄養塩濃度に関わり無く共通して繁茂する一次生産者を探索し、採取・分析を行った。

ラン藻類や底生大型緑藻の異常増殖は間隙水の栄養塩の中でも、特にリンの増加が原因との仮説を検証するために、ラン藻類と底生大型緑藻を各地点で採取し炭素・窒素・リンの濃度分析を行った。

安定同位体比および炭素・窒素・リン濃度は、採取した生物サンプルを現地で簡易乾燥機を使って約 40~50 度で一定値を示すまで温熱乾燥し、輸入に必要な手続きを共同研究者がロシアで行った後、空輸により日本に持ち込んで行った。

共生海綿は付着したラン藻類により共生藻の光合成が阻害されたことで衰退したとの仮説を検証するために、バイカル湖固有の共生海綿 *L. baicalensis* を対象に、付着藻類におおわれたものとそうでないものとで光合成活性と色素量の測定を、研究船上で行った。測定に供した試料の一部は乾燥・空輸後、炭素・窒素安定同位体比分析を行った。

2) 底生大型緑藻マットでの動物の大量死

図2で示した腹足類の大量死は、底生大型緑藻 *Spirogyra* のマット上で起こっていた。この腹足類が他の原因で死亡してマット上に打ち上げられたのか、乾出したマット上でも呼吸し移動できるのかや食性について、ロシアの専門家に問い合わせた。その結果、これらの腹足類は乾出した場所に生息し、底生藻類の補食者であることが分かった為、底生緑藻類によって動物が死亡する事例について文献調査を行った。

3) マイクロプラスチック

20 μ m メッシュネットの下に 30L でマークした容器を置き、ポンプで汲み上げた水をネットで濾過した。濾水量が 30L に達するごとに廃棄するプロセスを 10 回繰り返すことで 300L の濾水量とした(図3)。濾過終了後、船の水道水(濾過ユニットを通して)を使って容器上でネットを洗い、容器の水をガラスボトルに移した。ガラスボトルの水は 30 分以内に Whatman GF/D (d=47mm) フィルターで濾過し、40~50 度で温熱乾燥後、デシケーターで保管して日本に持ち帰った。



図3 マイクロプラスチックの採集

4. 研究成果

1) バイカル湖間隙水の富栄養化

間隙水の栄養塩濃度が非常に高かった原因として、世界遺産に登録されてから急速に観光客が増え、未処理で地下に浸透する尿尿が増加した影響が考えられた。そこで共同研究者の臨湖

実験施設で間隙水を採取するためのピットを作成し、ビクターが多い時期と少ない時期とで間隙水の栄養塩濃度と大腸菌の数を定期的に計測したところ、湖岸の間隙水の栄養塩濃度はビクターが多い時期に増加し、同時に大腸菌も増えることが分かった(主な発表論文: Timoshkin et al. 2018)。

バイカル湖で起こったような底生大型緑藻の異常繁茂について文献調査を行ったところ、北米の五大湖や世界の沿岸域でも起こっていることが分かった。沿岸域での底生大型緑藻の増加は近年 Green tide と呼ばれ、流入河川の栄養塩濃度が高くなくても、間隙水の栄養塩が高いことで発生している例が報告されていた。また五大湖では外来二枚貝の大量繁殖により、二枚貝から排泄されるリンの量が増えたことが底生大型緑藻の異常繁茂の原因であるとされていた。これらのことから、バイカル湖の湖岸で底生大型緑藻の異常繁茂が生じたのは、間隙水の栄養塩濃度、特にリンの濃度が増加したためである可能性が極めて高いと結論された。この結果はロシアで開催された国際会議で発表した(学会発表: Yamamuro 2018)。

本研究の成果により、バイカル湖での大型底生緑藻の異常繁茂が間隙水の栄養塩濃度の増加が原因で、増加した理由が不完全な下水処理であることが判明したことから、ロシア政府は2019年4月、バイカル湖固有の条件(集水域に小規模な集落が拡散し、厳寒な気候下にある)で機能する下水処理システムの開発を行うことを決定した。

バイカル湖沿岸域の動植物の炭素・窒素安定同位体比は分析が終了し、過去のデータとの比較検討を行っている。光合成活性を測定した *L. baicalensis* の安定同位体比も解析中である。

2) 底生大型緑藻マットでの動物の大量死

底生大型緑藻の異常繁茂が生態系に与える影響について文献調査を行ったところ、干潟の *Ulva* 属緑藻から発生した硫化水素で人が死んだ事例があった。人間にも致死的な硫化水素は、海産底生動物の生存時間を酸素欠乏だけの状態よりも3割以下に減らし、生態系にとって深刻な攪乱となる (Vaquer-Sunyer and Duarte 2010)。

一般に硫化水素が発生する硫酸還元反応は酸化還元電位が-200mV以下の還元環境で起こる反応で、干潟表層という300mV以上の酸化環境で起こる反応ではない。干潟で人間が死亡するほどの硫化水素が発生していたとすれば、大型底生緑藻の表層部で、硫酸還元反応が進行するような特異な環境が形成されていたことになる。Madinger et al. (2016) はバイカル湖で腹足類が大量死していた底生緑藻と同じ *Spirogyra* 属大型底生緑藻マットで、電極を使って硫化水素と溶存酸素を同時に測定した。その結果、太陽光の量が多く光合成を盛んに行っている時間帯の方が、日陰になっている時間帯よりもはるかに多く硫化水素が発生し、かつマット表層1cm以内でそれより深より高い濃度になっていた。

以上より、有肺類である *Radix* 属腹足類が *Spirogyra* 属底生緑藻マット上で斃死した原因は、硫化水素である可能性が高いと判断された。腹足類が採餌のためにマットに集まった時点では硫化水素は発生しておらず、滞在している間に硫化水素が発生して大量死したと考えられる。このことから大型底生緑藻は動物にとって餌資源であり、硫化水素が発生しなければ採餌されることで異常繁茂状態にならない可能性がある。実際、北米の河川で大発生する *Cladophora* 属大型底生緑藻について、ユスリカ科幼虫を補食する魚類が侵入できない籠を設けた区画では、ユスリカ科幼虫の採餌によって *Cladophora* 類が伸長できなかつたと報告されている (Power 1990)。

以上についてロシア国内で発表したところ(学会発表: Yamamuro 2018)、地元研究者の高い関心を集めた。その結果、本研究終了後となるが、*Spirogyra* 属底生緑藻の枯死前・枯死後での硫化水素発生状況や、硫化水素が発生しない状況では補食者がいるかなどの検討を共同で行うこととなった。

3) マイクロプラスチック

マイクロプラスチックの採集は2018年9月に行った。バイカル湖の湖流と航海中の天候などを考慮して、下記の7箇所で行った。

南部

Berezovyi cape

51° 50.538N 104° 54.155E 水深 10~13m

Sharyzhylgai 沖

51° 39.689N 103° 57.782E 水深 1200m

中央

Aya Bay 沖

52° 44.299N 106° 39.493E 水深 1100m

Aya Bay 海岸

52° 49.269N 106° 40.894E 水深 60m

Maloe More

53° 17.699N 107° 21.243E 水深 120m

北部

Bolishoi Solontsovy 沖

54° 01.267N 108° 33.371E 水深 931m

Bolishoi Solontsovy 沿岸

54° 09.506N 108° 23.980E 水深 315m

マイクロプラスチックの内容物の検討は μ FTIRを用いて行う予定であったが、分析を依頼した機関への装置の導入が遅れ、2019年5月現在、一部がまだ分析中である。一般にFTIRを用いた分析は200 μ m以上の粒子を対象にしているが、本研究では20 μ m以上の粒子を対象にした。これまでの結果で、同じ方法で分析下神奈川鶴見川河口のマイクロプラスチック濃度の2倍以上、Maloe Moreで大きい値が得られた。マイクロプラスチックの観点からも、バイカル湖では人為的汚染が進んでいることが分かった。

マイクロプラスチックの原料として何がどのくらい多いのかを確認するために、オリホン島の湖岸でプラスチックゴミの収集を行った(図4)。ペットボトルなど観光客が投棄したものが多かったが、場所によっては在住者による大型ゴミや、漁網なども集積していた。面積当たりプラスチックゴミ重量や内容は、共同研究者によって解析中である。



図4 バイカル湖オリホン島で回収されたプラスチックゴミ

<引用文献>

- 1) Madinger H.L., Wilson K.P., Goldstein J.A. and Bernot M.J. 2016. Biogeochemistry and nutrient limitation of microbial biofilms in Devils Hole, Nevada. *Western North American Naturalist*, 76, 53–71.
- 2) Power, M. E. 1990. Effects of fish in river food webs. *Science*, 250, 811-814.
- 3) Vaquer-Sunyer R. and Duarte C.M. 2010. Sulfide exposure accelerates hypoxia-driven mortality. *Limnology and Oceanography*, 55, 1075–1082.
- 4) Yamamuro, M., Minagawa, M., Kayanne, H. 1995. Carbon and nitrogen stable isotopes of primary producers in coral reef ecosystems. *Limnology & Oceanography*, 40, 617-621.
- 5) Yamamuro, M., Kayanne, H., Yamano, H. 2003. $\delta^{15}\text{N}$ of seagrass leaves for monitoring anthropogenic nutrient increases in coral reef ecosystems. *Marine Pollution Bulletin*, 46, 452-458
- 6) Yoshii, K., Melnik, N. G., Timoshkin, O. A., Bondarenko, N. A., Anoshko, P. N., Yoshioka, T., Wada, E. 1999. Stable isotope analyses of the pelagic food web in Lake Baikal. *Limnology and Oceanography*, 44, 502-511.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

- 1) 山室真澄 湖沼における大型植物の異常繁茂に関する国内外の状況. 応用生態工学 (受理) (査読有り)
- 2) Timoshkin O.A. 2018. Coastal zone of the world's great lakes as a target field for

- interdisciplinary research and ecosystem monitoring: Lake Baikal (East Siberia). *Limnology and Freshwater Biology*, 1, 81-97 (査読有り)
- 3) Timoshkin, O. A. Moore, M. V., Kulikova, N. N.ほか 11名 2018. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia), *Journal of Great Lakes Research*, 44, 230-244. (査読有り)
 - 4) Shirokaya, A. A., Sitnikova, T. Y., Kijashiko, P. V., Shydlovskyy, I. V., Prozorova, L. A., Yamamuro, M. 2017. A review of the Lake Baikal limpets, family Acroloxidae Thiele, 1931 (Mollusca: Pulmonata: Hygrophila), based on type specimens, with keys to the genera. *Archiv für Molluskenkunde*, 146, 9-64 (査読有り)
 - 5) Timoshkin, O.A., Samsonov, D.P., Yamamuro, M.ほか 26名 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger?, *Journal of Great Lakes Research*, 42, 487-497 (査読有り)

〔学会発表〕(計4件)

- 1) Kameda, Y., Yamamuro, M., Moore, M. V., Timoshkin, O. A.: Occurrence of fine microplastics and other emerging debris in Lake Baikal. 29th Annual Meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry- Europe (SETAC Europe), Expo and Convention Centre, Helsinki, Finland, 2019年5月27日
- 2) 山室真澄: 湖沼における大型植物の異常繁茂に関する国内外の状況: 日本陸水学会第83回大会(岡山大学津島キャンパス)2018年10月8日
- 3) Yamamuro, M.: Green tide from sea coasts to freshwater lakes. International Conference «Freshwater Ecosystems – Key Problems» (Conference Hall, Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Science) 2018年9月13日
- 4) Malnik, V. V., Timoshkin, O. A., Tomberg, I. V., Sakirko, M. V., Yamamuro, M.: Long-term hydrochemical and microbiological survey at Lake Baikal coastal zone. ASLO Aquatic Sciences Meeting 2017 (Hawaii Convention Center) 2017年2月17日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

- 国際学会でのセッション主宰 2017年2月27日 ASLO (American Society of Limnology and Oceanography) 2017 Aquatic Science Meeting 「Ecocrisis in Coastal Zone of Lake Baikal (Russia): An Argument for Coastal Monitoring of Large Lakes」(Hawaii Convention Center 313C)
- 研究代表者によるロシアでのテレビ番組出演 2017年2月4日 STUDIO LAVR 制作ドキュメンタリー
(<http://lavrstudio.com/en/films/documentaries/item/o-bajkale-nachistotu.html>)
- 新聞報道 2019年4月4日 毎日新聞(2面) 風知草「バイカル湖に寄せて」

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 田邊 優貴子

ローマ字氏名: Yukiko TANABE

所属研究機関名: 国立極地研究所

部局名: 研究教育系

職名: 助教

研究者番号: 40550752

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: オレグ ティモーシュキン

ローマ字氏名: Oleg TIMOSHKIN

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。