

三大湖沼の水質生態系に係る調査研究

十和田湖の水質及び動物プランクトンの変遷に係る一考察

生魚利治

十和田湖の水質及び動物プランクトンの出現状況について、その変遷から検討を行った。この結果、高村らが報告した2000年頃までの十和田湖の状況から、CODの増加、透明度の上昇及び動物プランクトン群集の変化等が見られることが明らかとなった。また、動物プランクトンの出現状況の変化が水質にも影響を与えていると推察されたことから、十和田湖は依然としてトロフィックカスケード効果の影響を受ける湖であることが示唆された。今後は、植物プランクトンや魚類なども含めた生態系、深水層の水質及び気候変動から受ける影響も含めて検討及びモニタリング調査を重ね、十和田湖の水質及び生態系についてより良い管理方法を模索していく必要があるものと考えられた。

1. はじめに

十和田湖(図1)は、秋田県及び青森県の山間部の県境にまたがる二重カルデラ湖で、湖面標高400m、表面積61.1km²、平均水深71.0m、最大水深326.8m、湖体積は4.19km³である。



図1 十和田湖

十和田湖は、もともと魚類の生息しない湖であったが、1884年から1945年の間に12種の魚の導入が試みられた。この中で支笏湖から導入されたヒメマスが定着し、以降主要な水産資源となっている。しかし、1980年頃に湖内に混入したと考えられるワカサギの影響を受け、1985年にヒメマスの漁獲量が激減し、代わってワカサギが大漁となった。以降も両種の漁獲量(図2)は、増減を繰り返し、不安定のみである。

十和田湖には、生活環境項目に関する水質環境基準の類型として湖沼AAが当てはめられている。しかし、化学的酸素要求量(以下、COD)の75%値(図3)は、1986年に1.1mg/Lと環境基準値を超過し以降も増加傾向にある。また、

透明度の年平均値(図4)は、1985年以降悪化し2000年には最低値である7.1mを記録するなど、水質悪化が懸念された。

このため、秋田・青森の両県は十和田湖の水質改善及びヒメマスの資源量回復を目的として2001年に「十和田湖水質・生態系改善行動指針」(以下、指針)を策定し、2015年の改定を経ながら指針に沿った様々な取り組みを実施してきた。指針では、水質の改善目標値としてCOD75%値を1mg/L以下、透明度の年平均値を12m以上としている。

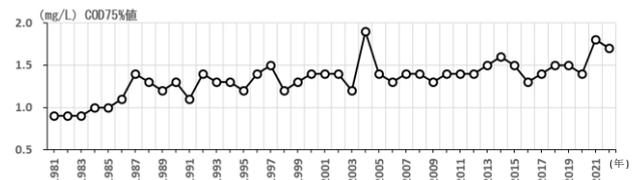


図3 湖心のCOD(表層及び5m層の平均)75%値の推移

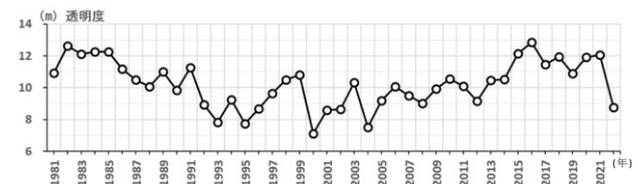


図4 湖心の透明度年平均値の推移

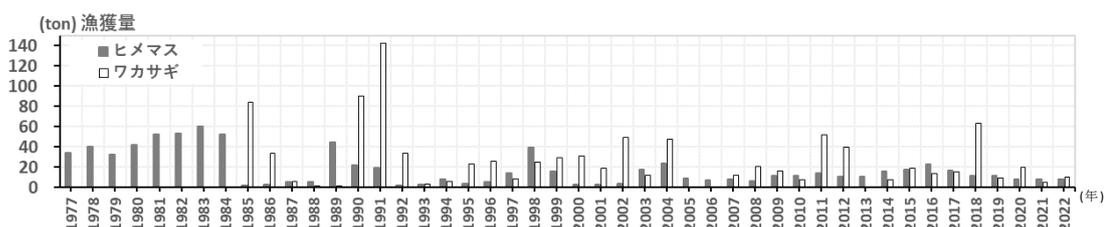


図2 ヒメマス及びワカサギの漁獲量の推移

高村らの調査¹⁾によって、十和田湖は、湖内における食物連鎖の最上位に位置する捕食者の影響が下位の植物プランクトンや透明度といった水質にまで段階的に伝搬するトロフィックカスケード効果を強く受ける系であることが示唆されている。ヒメマス漁獲量の減少は、混入したワカサギとヒメマスがミジンコ属等の大型の動物プランクトン種の捕食をめぐって競合したことにあり、1985年からの透明度の悪化は、この競合により動物プランクトン群集が小型種へとシフトしたことで湖内に残存する粒子が増加したことによると考えられている。

しかし、透明度の年平均値は、2015年に12.1 mと初めて目標値を達成するなど、近年改善傾向にあることから、十和田湖は、高村らが報告した2000年頃までの状況から変化していることが推察される。このため本報告では、関連する水質項目及び動物プランクトンについてまとめ、その変化について検討した。

2. 方法

2.1 水質

水質の値は、秋田・青森両県が実施する公共用水域水質調査の結果のうち、湖心の1977年から2022年までの計46年間の月ごとの値を用いた。検討には、CODの表層水及び水深5 m層の平均値（以下、COD ave.）、透明度、表層水のクロロフィル a 濃度（以下、Chl-a）及び硝酸態窒素濃度（以下、NO₃-N）の項目を使用した。

COD ave.、透明度及びChl-aは、月別の平均値を算出した。算出には、4月から11月に毎月の調査が継続して実施されるようになった1981年以降（1981年は5月から10月）の値を使用した。平均した年は、ワカサギが漁獲される前の1981年から1984年の4年間、以降はおよそ10年間ごとに1985年から1994年、1995年から2004年、2005年から2014年及び2015年から2022年とした。なお、平均値を求める際に報告下限値未満を含む場合は、報告下限値を代入して算出した。

2.2 動物プランクトン

動物プランクトンの結果は、秋田県水産振興センターが毎年主に6月、8月及び10月頃の年

3回、湖内の10地点（1978年6月は8地点、同年8月から1980年10月は11地点、2004年10月は4地点）で北原式定量ネット（NXX-13目合0.1 mm）を用いて水深16 mから鉛直引きにて採集して種ごとに計数し、各年度の業務報告書等で報告している値を用いた。このうち、1978年から2022年までの計45年分の結果を集計し、調査ごとに全地点の平均値を算出した。出現種が多いため、類または属ごとに集約し、中でも出現数が多いミジンコ属、ゾウミジンコ属、カイアシ類（ヤマヒゲナガケンミジンコ属、ケンミジンコ属、コペポダ幼生）、カメノコウワムシ属、フクロワムシ属及びツノオビムシ属を検討に用いた。なお、カイアシ類の幼生であるノープリウス幼生及びコペポデイドは、コペポダ幼生として集約した。

3. 結果

3.1 水質

3.1.1 COD ave.

経月変化（図5-a）は、1986年から1988年頃にかけて大きく上昇し、以降も増加傾向にある。2 mg/Lを超えたのは過去に4回あり、いずれも6月または7月であった。最大値は、2021年6月の2.4 mg/Lであった。各年の変動幅は、1988年から2003年頃までおおむね0.5 mg/L程度であったが、2005年以降は0.8 mg/L程度となった。

月別平均値（図5-b）は、1981年から1984年、1985年から1994年、1995年から2004年の平均値に経月的な変化は見られないが、その値はそれぞれ約0.8 mg/L、約1.0 mg/L及び約1.2 mg/Lと増加していた。また、2005年から2014年及び2015年から2022年の各平均値の推移は、4月から7月頃まで上昇し、8月から11月は7月までに比較して高い値で推移した。

3.1.2 透明度

経月変化（図6-a）は、1986年から1993年頃にかけて低下傾向を示し、以降は2004年までは横ばい傾向であったが、その後、改善傾向に転じた。透明度が5.0 m以下となったのは4回あり、最低値は、2004年6月の4.0 mであった。指針を策定した2001年以降で改善目標値である12 m以上となったのは46回あり、最高は2001年5月の17.5 mであった。

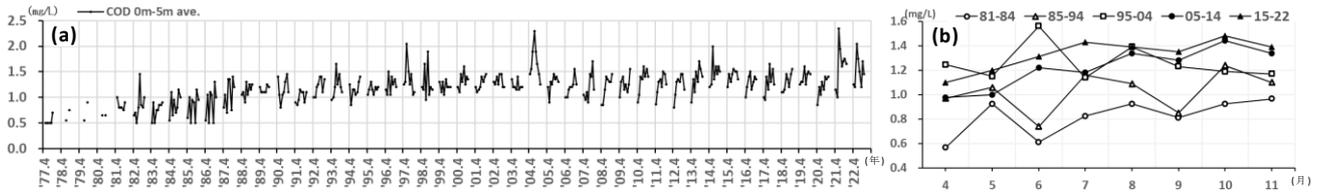


図5 COD ave. (a)経月変化※ ※報告下限値未満の月は報告下限値をプロット, (b)月別平均値

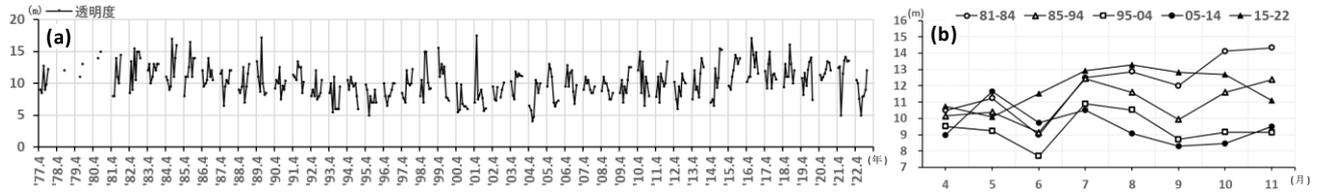


図6 透明度 (a)経月変化, (b)月別平均値

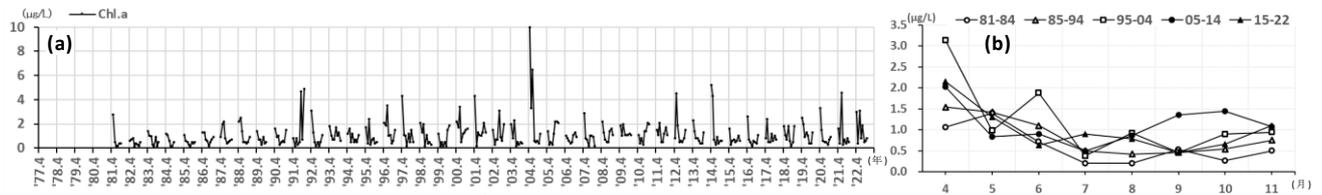


図7 Chl-a (a)経月変化※ ※報告下限値未満の月は報告下限値をプロット, (b)月別平均値

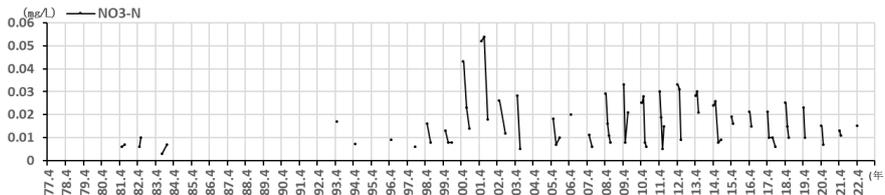


図8 NO₃-Nの経月変化※ ※報告下限値が2008年に大幅に変更となったため報告下限値未満の月はプロットしていない。

月別平均値(図6-b)は、1985年から1994年、1995年から2004年及び2005年から2014年の平均値に経月的な変化は見られないが、1981年から1984年及び2015年から2022年は、4月から6月に比較し7月以降が高くなる傾向を示した。

3.1.3 Chl-a

経月変化(図7-a)は、1991年以降、特に4月に3 μg/Lを超える年が見られるようになった。4月から6月にその年の最大値を示し、7月以降の月はほぼ1 μg/L以下となる傾向を示すが、1991年は11月に4.9 μg/L、2005年は9及び10月に2.2 μg/L、2010年は10月に2.1 μg/Lと10月または11月に2 μg/Lを超えてその年の最大値を示すことがあった。

月別平均値(図7-b)は、1981年から1984年の平均値を除き、4月が最も高く7月にかけて減少する傾向がみられた。7月以降は、1 μg/L以下の値を示す傾向にあるが、2005年から2014年の平均値のみ9月及び10月に1 μg/Lを超えた。

3.1.4 NO₃-N

NO₃-Nの推移(図8)は、例年、4月または5月が最も高く6月頃までは減少しつつも2008年以降の報告下限値である0.005 mg/Lを超えて検出されるが、7月以降の値はほぼ0.005 mg/L未満となった。

3.2 動物プランクトン

3.2.1 ミジンコ属

十和田湖に出現するミジンコ属(図9-a)は、2006年及び2008年に1個/L未満でカプトミジンコ(*Daphnia galeata*)が出現したが、それ以外は全てハリナガミジンコ(*D. longispina*)である。ワカサギが漁獲され始めた1985年以降は、出現が観測されなかった年もあったが、2009年以降は2012年を除き8月または10月に1個/Lを超えて出現し、2018年8月には22.75個/Lで最大値となった。また、出現の傾向は、調査が実施されている月の中で、1984年までは8月が多く、次いで10月が多い傾向にあったものが、1985年

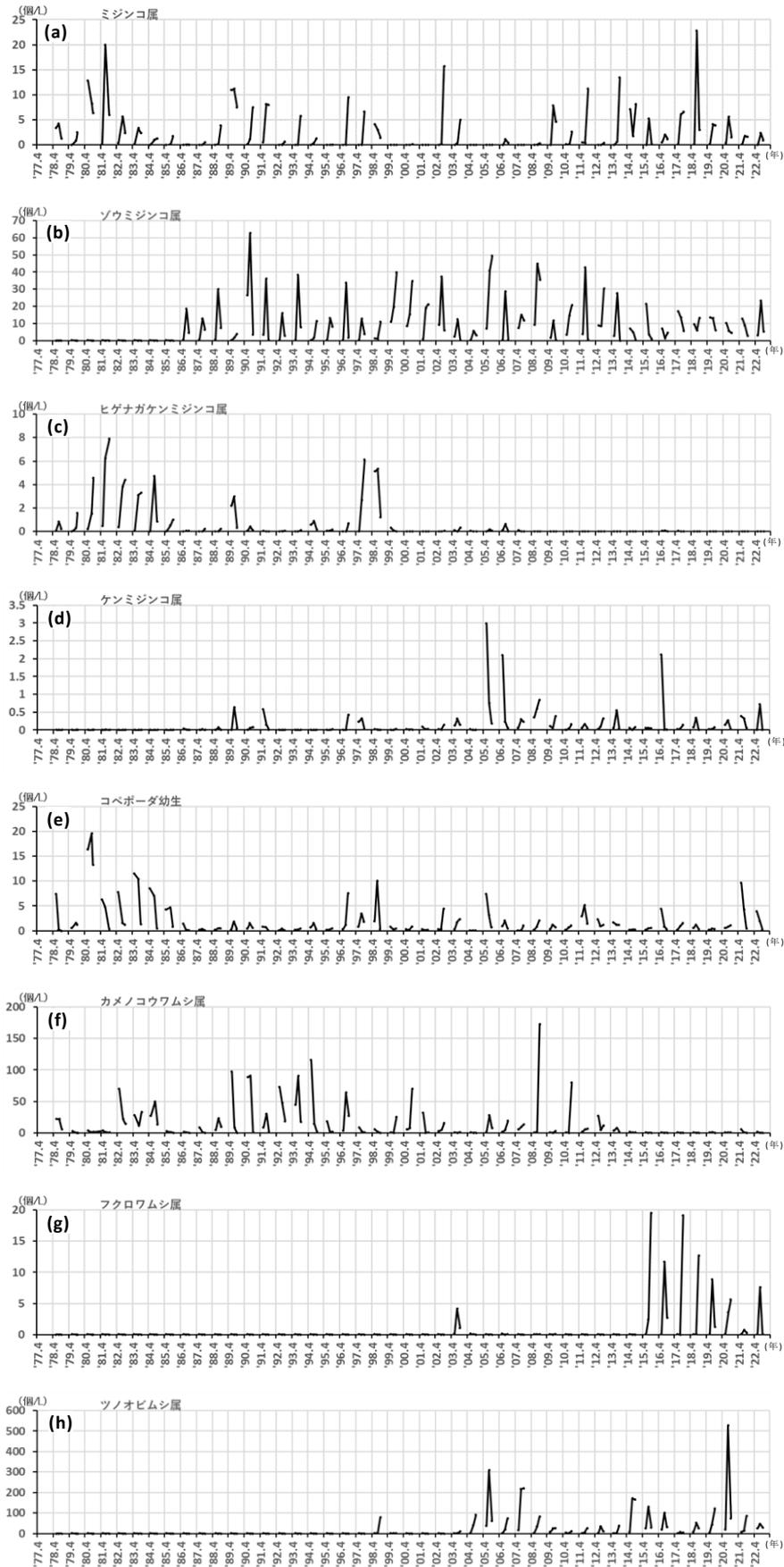


図9 動物プランクトンの出現状況の推移

- (a) ミジンコ属、(b) ゾウミジンコ属、(c) ヒゲナガケンミジンコ属、(d) ケンミジンコ属、
 (e) コペポーダ幼生、(f) カメノコウワムシ属、(g) フクロワムシ属、(h) ツノオビムシ属

から2014年までの出現が観測された年は10月が多い傾向となった。2015年以降は、1984年までと同様の8月が多い傾向に戻った。

3.2.2 ゾウミジンコ属

十和田湖に出現するゾウミジンコ属(図9-b)は、ゾウミジンコ(*Bosmina longirostris*)一種である。1978年、1979年及び1985年にも0.01個/L未満ではあるが、その出現が観測されている。1986年からは10個/Lを超えて出現するようになった。以降、2013年まで8月または10月に出現数が最大となり、30個/Lを超える月もあった。2014年以降は、8月及び10月の出現数が減少して6月に最大となる年が多くなり、その数が30個/Lを超えることはなくなった。

3.2.3 カイアシ類

十和田湖に出現するヒゲナガケンミジンコ属(図9-c)は、ヤマヒゲナガケンミジンコ(*Acanthodiptomus pacificus*)一種である。1979年から1985年までは、毎年8月または10月に1個/Lを超えて出現していたが、1986年以降に1個/Lを超えて出現した月があるのは1989年、1997年及び1998年の3回のみであった。2007年以降の出現は、ほとんど観測されていない。

ケンミジンコ属の主な出現種(図9-d)は、ケンミジンコ(*Cyclops strenuous*)またはオナガケンミジンコ(*C. vicinus*)である。2004年までは、1個/L未満の出現が単発的に観測されていたが、2005年からはほぼ毎年出現し、2005年、2006年及び2016年の6月は2個/Lを超えて出現した。

コペポーダ幼生(図9-e)は、1986年以降1995年までほとんど出現しない年が続いたが、以降は、1999年から2001年及び2004年を除いて毎年1個/Lを超えて出現する月があった。

3.2.4 カメノコウワムシ属

十和田湖に出現するカメノコウワムシ属(図9-f)は、コシブトカメノコウワムシ(*Keratella quadrata*)または、カメノコウワムシ(*K. cochlearis*)である。2019年まではコシブトカメノコウワムシがそのほとんどを占めていたが、2020年からはカメノコウワムシが占めるようになった。2012年までは、10個/Lを超えて出現する月が多く、50個/Lを上回る月もあったが、

2013年以降は10個/Lを超えて出現する月はなくなった。

3.2.5 フクロワムシ属

十和田湖に出現するフクロワムシ属(図9-g)は、そのほとんどがヘリックフクロワムシ(*Asplanchna herricki*)である。2015年から毎年その出現が観測され、8月または10月に出現が多い傾向があった。

3.2.6 ツノオビムシ属

十和田湖に出現するツノオビムシ属(図9-h)は、そのほとんどがイケツノオビムシ(*Ceratium hirundinella*)である。2003年までは1998年の10月を除き、10個/Lを超えて出現することはなかったが、2004年からはほぼ毎年10個/Lを超えて出現した。出現数は、6月が少なく8月が最も多い傾向があり、100個/Lを超えて出現する月もあった。

4. 考察

十和田湖の表層水は、水質調査を実施している4月から11月の間では、NO₃-N及びChl-aは4月または5月が高く、7月以降はほとんど検出されない傾向を示す。また、透明度は4月から6月が低い傾向を示す。十和田湖の循環型は、全面結氷しない²⁾ことから、1回の長い循環期を持つ一循環湖³⁾であると考えられ、その期間は花石らの調査結果⁴⁾から、1月上旬頃から5月上旬頃までと考えられる。NO₃-Nの値が4月及び5月に高くなることについては、成層期に無光層で蓄積していたNO₃-Nの鉛直循環による供給及び集水域の積雪に含まれるNO₃-Nの雪解けによる供給によるものと考えられる。Chl-aが4月及び5月に高い傾向を示すことは、豊富に供給されるNO₃-N等の栄養塩類及び長くなる日照時間(図10)により、春のブルームと呼ばれる植物プランクトン

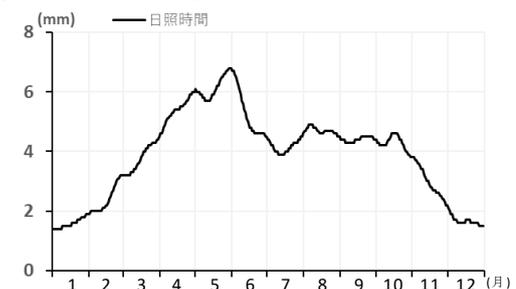


図10 休屋における日照時間の推移 (30年(1990~2020)の日平均値⁵⁾)

が活発に光合成を行い増殖している状態にあることを反映したものと考えられる。また、春のブルームにより表層水中に粒子態が増加するため、4月から6月の透明度は低い傾向を示すと考えられる。NO₃-Nが7月以降に検出されなくなることは、植物プランクトンの増殖によって消費されることに加え、表層水への供給が湖内の成層及び雪解けの終了によって減少したことによると考えられる。Chl-*a*が7月以降に検出されなくなることは、表層水から栄養塩類が枯渇するため植物プランクトンの増殖が制限されることによると考えられる。

透明度の年平均値が1984年以前及び2015年以降で約12mと高くなったことは、この期間に見られる7月以降の透明度の上昇によると考えられる。多くの湖では、春のブルーム後に植物プランクトンを捕食する甲殻類動物プランクトンが増え、透明度が上昇する透明期³⁾に入ることが知られている。特にミジンコ属は、おおよそ1µm未満から40µmを超える広範囲の大きさの粒子を捕食可能であることに加え、濾食速度も早いことため透明度の上昇に寄与する^{6,7)}ことが知られている。結果に示したとおり、ミジンコ属は1984年以前及び2015年以降は毎年出現し、8月の出現数が最も多くなる傾向が見られたことから、7月以降の透明度の上昇に寄与しているものと考えられる。

2005年以降のCOD ave.の8月から11月の月別平均値が、2004年以前に比較して高いことは、その一因として2004年からほぼ毎年8月以降に出現するツノオビムシ属の影響が考えられる。ツノオビムシ属は、本報告では動物プランクトンとして取り扱っているが、葉緑体を持ち光合成をすることから、植物プランクトンとして分類されることもある種である。十和田湖のツノオビムシ属の主な出現種であるイケツノオビムシは、60から200µm⁸⁾と大型のため、動物プランクトンからの捕食を受けにくいと考えられる。このため、ツノオビムシ属の出現は、水中に残存する有機物量すなわちCODの増加に寄与すると考えられる。また、ツノオビムシ属は、鞭毛を持ち遊泳することから、表層水から栄養塩類が枯渇しても、栄養塩類が蓄積する深水層へ遊泳可能なため、多くの湖で晩夏や秋の植物プランクトン優占種となる³⁾ことが知られている。十和田湖においても、それ

まで利用されることがなかった成層期の深水層に蓄積する栄養塩類が、ツノオビムシ属の出現により利用されることが考えられ、CODが増加する一因となることが推察される。

動物プランクトンは、1999年以降のヒゲナガケンミジンコ属の減少、2005年以降のケンミジンコ属の増加、2009年以降のミジンコ属の増加、2013年以降のカメノコウワムシ属の減少、2014年以降のゾウミジンコ属の減少、2015年以降のフクロワムシ属の増加など、その出現状況が変化し続けていることが明らかとなった。カイアシ類は、2000年頃を境にそれまでヤマヒゲナガケンミジンコが主な出現種であったものが、ケンミジンコ属に変化していることが推測されている⁹⁾。ケンミジンコ属は、その多くの種が成体になると動物プランクトンも食べる雑食に変わり、ワムシやゾウミジンコも補食する⁷⁾。また、フクロワムシ属は、ワムシ類の中でも大型で捕食性を持ち、小型のワムシ類を捕食する³⁾。これらのことから、小型の動物プランクトンであるカメノコウワムシ属及びゾウミジンコ属の減少は、カイアシ類の出現種の変化及びフクロワムシ属の増加といった捕食性動物プランクトンからの捕食圧の増加が一因となっていると推察される。このほか、2009年以降に出現が毎年見られるようになったミジンコ属との餌となる植物プランクトンをめぐり競争も影響していると考えられる。このように、動物プランクトン群集は、再び大型種に移りつつあることが推測される。

5. おわりに

十和田湖の動物プランクトンの出現状況は、高村らが報告した2000年以降も変化が続いていることが明らかとなった。また、その変化は、植物プランクトンを介してCODや透明度といった水質まで影響していると推察されたことから、十和田湖は依然としてトロフィックカスケード効果の影響を受ける湖であることが示唆された。一方で、動物プランクトンの出現状況の変化は、湖内の植物プランクトン群集や魚類と相互的に影響を及ぼしあうと考えられるが、本報告ではこれらを含めた検討には至っていない。また、ツノオビムシ属が深水層の栄養塩類を利用していると推測されたように、プランクトンの出現状況の変化は深水層の水質にも影響を及ぼしているものと

考えられる。今後は、植物プランクトン、魚類及び深水層の水質等の調査結果も含め、より詳細な検討を重ねていく必要があると考える。

また、近年、気候変動は淡水生態系においても生態系に重大な損害と損失を及ぼす¹⁰⁾とされている。本報告の水質や動物プランクトンの出現状況の変化が、気候変動の影響を受けたものかを判断することはできないが、2021年6月には気象条件が要因と考えられるウログレナ属 (*Uroglena sp.*) による淡水赤潮と見られる事象が発生した^{11,12)}ほか、十和田湖休屋におけるアメダス⁵⁾の観測史上において、2022年8月に月降水量の最大値を記録し、2023年8月には月平均気温の最大値を記録するなど、気候変動は今後の十和田湖の水質及び生態系にも影響を及ぼすものと考えられる。

今後は、このような気候変動から受ける影響も注視しながらモニタリング調査を継続し、今後の十和田湖の水質及び生態系について検討を重ねながら、より良い管理方法を模索していく必要があるものとする。

参考文献

- 1) 高村典子, 三上一, 水谷寿, 長崎勝康: ワカサギの導入に伴う十和田湖の生態系の変化について, 国立環境研究所研究報告, **146**, 1999, 1-15.
- 2) 徳井利信: 十和田湖のヒメマスの研究(Ⅱ), 北海道さけ・ますふ化場研究報告, **14**, 1959, 169-192.
- 3) アレキサンダー・J・ホーン, チャールス・R・ゴールドマン: 陸水学, 京都大学学術出版, 1999.
- 4) 花石竜治, 三上一, 野澤直史, 成田俊, 松尾章: 水温の連続測定から見た十和田湖の水温の季節変動, 青森県環境保健センター研究報告, **15**, 2004, 23-30.
- 5) 気象庁: 過去の気象データ検索, URL. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> [accessed August 10, 2024].
- 6) 花里孝幸: ミジンコはすごい, 岩崎ジュニア新書, 2006.
- 7) 花里孝幸: ミジンコその生態と湖沼環境問題, 名古屋大学出版会, 1998.
- 8) 一瀬諭, 若林徹哉: やさしい日本の淡水プランクトン図解ハンドブック(改訂版), 合同出版, 2009.
- 9) 水谷寿: 秋田の川と湖を守り豊かにする研究(十和田湖観光資源ヒメマスの維持培養), 平成21年度秋田県農林水産技術センター水産振興センター事業報告書, 2011, 279-294.
- 10) 環境省: IPCC第6次評価報告書第2作業部会報告書「政策決定者向け要約」環境省による確定訳, 2023.
- 11) 鈴木大志, 生魚利治: 十和田湖の水質調査結果～令和3年6月の調査結果に関する一考～, 秋田県健康環境センター年報, **18**, 2022, 66-69.
- 12) 高田芳博, 八木澤優, 黒沢新, 秋山将: 湖沼河川における水産資源の安定化と活用に関する研究(十和田湖ヒメマスの資源対策調査), 令和3年度秋田県水産振興センター業務報告書, 2022, 132-142.