

[環境保全の現状]

変貌する釧路湿原東部湖沼の生態系 ——不可逆的な生態系劣化の予防とその再生

高村 典子

国立環境研究所 環境リスク研究センター 生態系影響評価研究室 室長／
重点研究プロジェクト「生物多様性と生態系機能の視点に基づく環境リスク
影響評価手法の開発」リーダー

『生物の科学 遺伝』 72～78頁

2010年5月1日発行(奇数月1日発行)第64巻第3回配本

発行:(株)エヌ・ティー・エス

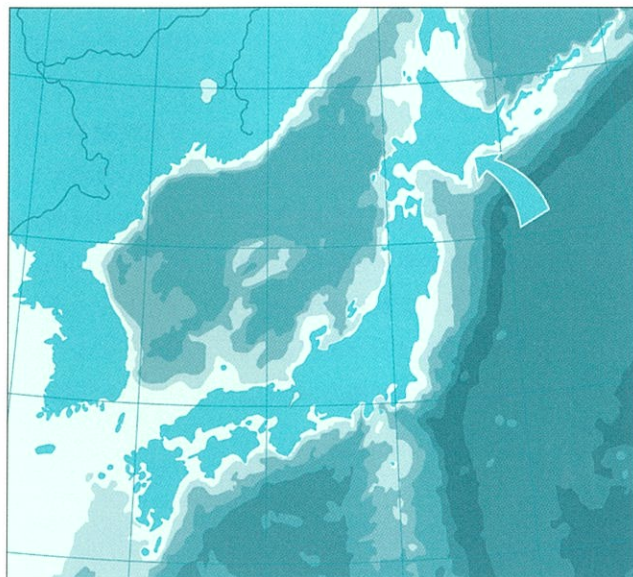
変貌する釧路湿原東部湖沼の生態系

——不可逆的な生態系劣化の予防とその再生

高村 典子 *Noriko Takamura*

国立環境研究所 環境リスク研究センター 生態系影響評価研究室 室長／
重点研究プロジェクト「生物多様性と生態系機能の視点に基づく環境リスク影響評価手法の開発」リーダー

釧路湿原東部の湖沼生態系は、2000年前後を境に、生物多様性が豊かな「澄んだ水の状態」からアオコが発生する「濁った水の状態」へと大きく変貌しつつある。このような非線形な変化は、外部からの過重な栄養塩負荷により引き起こされる。生態系の各状態は比較的安定であるため、変化の予測や劣化した生態系の回復には困難が伴う。外部攪乱の低下に努めるとともに、好ましい生態系を維持するための安定領域を増やす努力が必要である。



① はじめに

私は、2000年夏に初めて北海道釧路湿原東部湖沼で調査を行った¹⁾。釧路湿原は日本最大の面積（約190 km²）を誇る湿原であり、1980年にラムサール条約の湿地に登録され、1987年には国立公園に指定されている。それまで霞ヶ浦を主なフィールドとしていた私には、訪れた目の前の湖沼は、自然の湖岸で囲まれ、湿地や林が隣接する、きわめて自然度が高い湖沼に見えた。しかし、調査を進めてみると、これらの湖沼環境が生態系や生物多様性の保全にとってきわめて厳しい現状に置かれていることを知った²⁾。

本稿では、まず変貌を遂げる釧路湿原東部湖沼の現状を報告する。その次に、非線形に変化する湖沼生態系の特

徴を述べ、浅い湖沼の保全・管理についての留意点を述べる。

② 変貌を遂げる釧路湿原東部の湖沼生態系

2.1 水質の変化

釧路湿原東部に位置する3つの浅い河跡湖（図1）は、北からシラルトロ湖（面積1.81 km²、平均水深1.5 m）、塘路湖（6.37 km²、5 m）、達古武沼（1.36 km²、1.9 m）で、湖沼の水はおおの異なる集水域から集められ、湖を通り、ともに釧路川へと下る。これら3湖沼の水は公共利用がないため、公共用水域*に指定されておらず、行政機関による定期的な水質モニタリングは行われていない。

図2に、3湖沼の夏季の水中のクロロフィルa量（植物プランクトン量の指標）の変化を示す。塘路湖では、すでに1981年にクロロフィルa量が70 μg L⁻¹と過栄養に近い高い値を示し、1980年代にはアオコが大発生していた。一方、達古武沼では、1996年までクロロフィルa量は1.8～11.3 μg L⁻¹ときわめて低かったが、2000年に88.3 μg L⁻¹と高濃度になった。同様に、シラルトロ湖も2003年までは2.9～23.1 μg L⁻¹と低かったが、2004年に61.0 μg L⁻¹

【公共用水域】

水質汚濁防止法によって定められる、公共利用のための水域や水路のこと。湖沼については、天然湖沼および貯水量1,000万m³以上の人工湖を対象としている。



と高濃度になった。そして、達古武沼、シラルトロ湖ともにアオコの大発生が見られるようになった。

湖沼の植物プランクトンは、主に水中の窒素とリンを吸収し、炭酸同化作用により増殖する。その増殖を制限する栄養塩は、水中の窒素とリンのどちらかである。達古武沼とシラルトロ湖の湖水の全窒素量：全リン量（重量比）はおおむね10以下であり、これは両湖の植物プランクトンの増殖がリンでなく窒素の制限下にあることを示す。図3は、3湖沼の夏季の湖水中の全窒素量の経年変化を示す。全窒素量の変化は、先に示したクロロフィル a 量の急激な変化と対応しておらず、1980～1990年代のクロロフィル a 量の低い時期からすでにある程度高い、富栄養のレベルに達していたと言える。

2.2 植生群落の変化

2000年8月に私たちが調査をしたとき、シラルトロ湖は水が透明で、湖底の1/3以上は沈水植物群落で覆われていた。一方、達古武沼にはすでにアオ

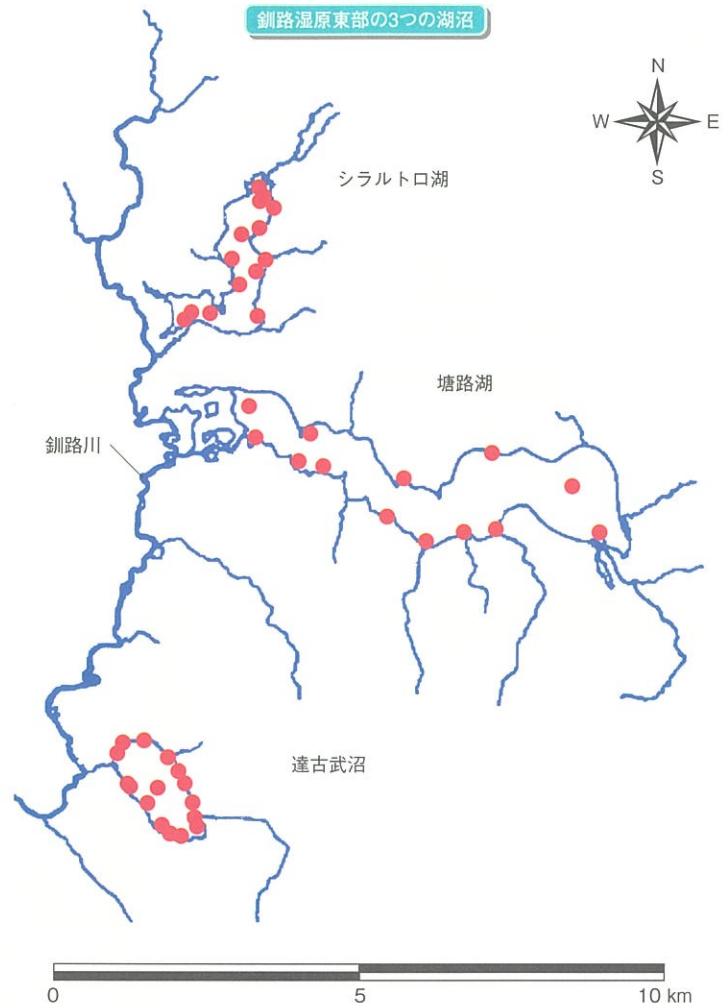


図1 釧路湿原とシラルトロ湖、塘路湖、達古武沼

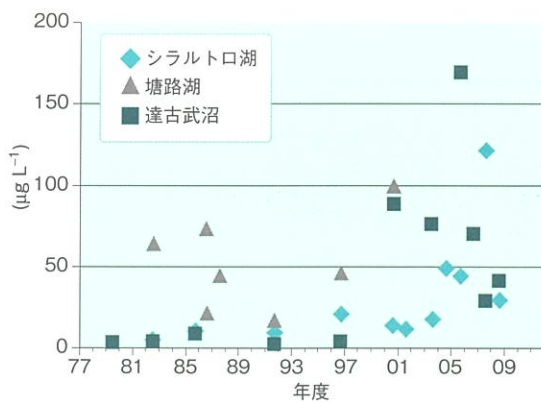


図2 湖水中のクロロフィル a 量の変化
いずれも夏季、湖沼中央部で測定した値の平均値をプロットした。測定は、北海道環境科学研究センター、国立環境研究所、また最近では達古武沼について自然再生事業のためのモニタリングとして環境省北海道事務所が実施したもの

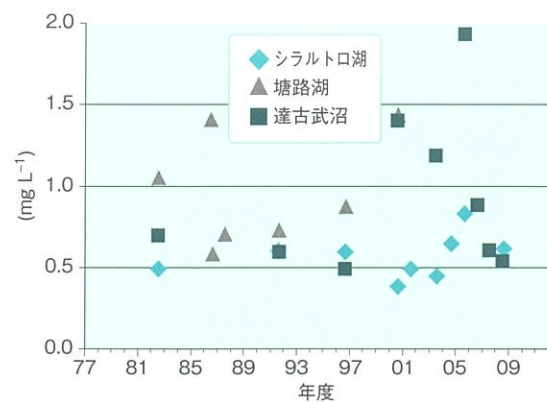


図3 湖水中の全窒素量の変化（詳しくは図2と同じ）

図2 湖水中のクロロフィル a 量の変化



コが発生しており、シラルトロ湖のように湖底が澄んで見えるほど透明度は良くなかった。それでも、マツモやホザキノフサモなどの沈水植物が、まだ湖底の広い範囲に生育していた。ヒシ群落は、両方の湖ともに南側と湖岸の所々にパッチ状に存在していた。

図4は、達古武沼の浮葉植物群落と沈水植物群落の被度の変化を示したものである。沈水植物は体の大部分を水面下で過ごす植物で、地下茎や根だけが水中にあるヨシなどの抽水植物や葉

を水面に浮かせるヒシなどの浮葉植物のように、その植生の広がりを空中写真で面的に捉えることが困難である。そのため、面的な記録が残りにくい。幸い、達古武沼では国土地理院が1992年に湖沼底質地図を作成していた。2003年には、北海道環境研究センターの五十嵐聖貴氏と筆者がカヌーで植生分布をGPSでトレースした。これで見えてわかるように、達古武沼では1992年に沼一面に沈水植物が繁茂していたが、わずか10年余りで沈水植物群落は南に

一部残るのみとなり(図5A)、北側の沼の大部分がアオコに覆われるように変貌した(図5B)。一方、シラルトロ湖については、2004年に青い粉を吹いたような粒子が湖面に現れたかと思うと(図6)、その翌年にはアオコが湖面を覆うようになった。2007年と2008年に実施した夏のグリッド調査では、沈水植物群落は沼の中央部の左岸と右岸に残るのみとなった³⁾。

このように、湖水の栄養塩は同じレベルでも、沈水植物群落の被度が大き



1992年の浮遊植物にはヒシ以外のネムロコウホネやヒツジグザも含まれる(2007年と2008年のデータは文献12より)

図4 達古武沼での植生変化

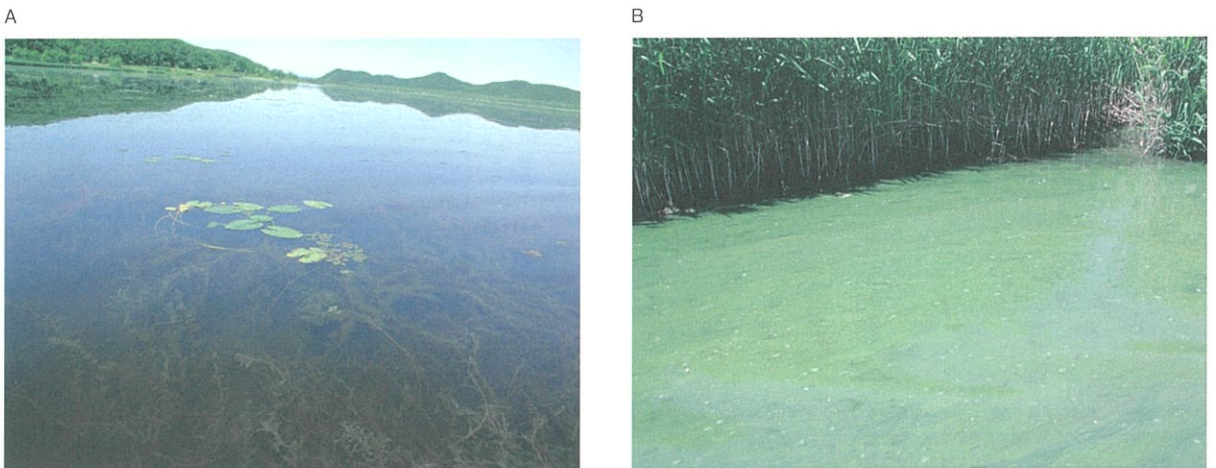


図5 達古武沼の南側の沈水植物群落(A)と北側に発生したアオコ(B)(いずれも2003年7月6日撮影)



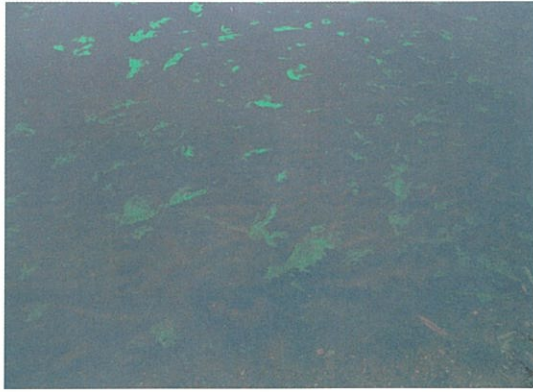


図6 シラルトロ湖に発生したアオコ (2004年9月2日撮影)



図7 達古武沼のヒシ群落 (2008年8月5日撮影)

いと水が透明で、水中の植物プランクトン量は低く抑えられていた。しかし、沈水植物群落の衰退とともに、アオコが大発生するようになった。さらに、達古武沼もシラルトロ湖も、私の知るかぎり、2007年以降にヒシ群落が増大し続け、達古武沼では2008年はほとんどの湖面をヒシ群落が覆うようになった(図4, 図6)。

2.3 生物多様性の喪失

沈水植物群落の減少とともに、湖内の生物多様性は著しく低下した。神戸大学の角野康郎教授の調査記録によると、3湖沼での水生植物の確認種数は減少の一途をたどっている⁴⁾。達古武沼では、1975/76年と1991年の調査で沼内に24種の水生植物が確認されていた。これらのうち、次に述べる16種が2000年以降に生育場所を極端に減らし、かろうじて生育しているか、もしくは確認ができなくなった。浮葉植物ではカラフトグワイ(絶滅危惧IA類CR)とネムロコウホネ(絶滅危惧II類VU)、ヒツジグサ、オヒルムシロの4種、沈水植物ではナガバエビモ(CR)、イトイバラモ(絶滅危惧IB類EN)、タヌキモ(準絶

滅危惧種NT)、カタシャジクモ(絶滅危惧I類CR+EN)、クロモ、セキショウモ、ヒロハノエビモ、イバラモ、フサモ、ミゾハコベの10種、浮遊植物ではヒンジモ(VU)とムラサキコウキクサの2種である⁵⁾。また、東京大学の西廣淳氏らの2007年のシラルトロ湖の調査でも、1990/91年の調査時には確認されたオヒルムシロ、ホソバヒルムシロ(VU)、エゾヒルムシロ、イトモ(NT)、イトイバラモ(EN)、パイカモ、ミゾハコベ、ヒンジモ(VU)の8種の生育確認ができなかった⁶⁾。以上の水生植物のうち、9種は環境省レッドリスト掲載種⁷⁾で、全国的にその絶滅が危惧される種である。

水生昆虫や甲殻類など無脊椎動物の仲間には、植生に生息基盤を置いている生きものが多くいると考えられる。達古武沼の底泥中に棲む無脊椎動物の種組成は、底泥の上の沈水植物の現存量に大きく依存して変化し、それらの無脊椎動物の種多様度は、底泥の上に生育する沈水植物群落の種数が多いと増える関係を示した⁸⁾。このように、多様な沈水植物群落の喪失は生態系全体の種多様度の著しい喪失も招くのである。

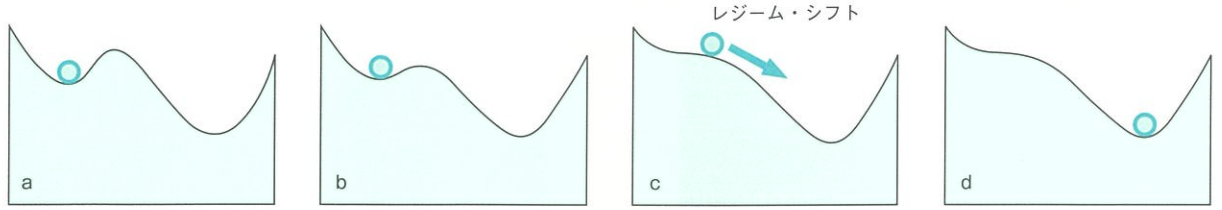
③ 非線形に変化する湖沼生態系とその特徴

3.1 生態系のレジーム・シフト

釧路湿原東部湖沼は、最近のわずか10年の間に、沈水植物群落が多様な生物が棲む「水が澄んだ状態」からアオコが大発生する、生物多様性が低下した「水が濁った状態」に急激に変化した。さらに、現在、湖一面がヒシ群落に覆われるという異常な状態に移行している(図7)。このように、生態系が短期間の間に急激に変化し、別の状態になることを「生態系のレジーム・シフト」という⁹⁾。特に、生物多様性の減少と生態系機能の劣化の方向に移行する好ましくない跳躍的な変化は「カタストロフィック・レジーム・シフト」と呼ばれる。

非線形に変化するこのような生態系の挙動は、図8のようにお椀の中をビー玉が動くようなモデルを用いて説明される¹⁰⁾。「谷」が1つの場合は、外的攪乱を受けた後、常に一つの同じ状態に戻るが、2つ以上の場合は「尾根」を越え別の「谷」に移る場合が生じる。「谷」の中では複数のフィードバックが働





生態系がある安定状態にある (a)、たとえば農地からの栄養塩の流入により安定領域が小さくなった状態 (b)、レジリエンスが失われレジーム・シフトが起こる (c)、別の安定状態に移行した状態 (d)

(文献10より改図)

図8 非線形に変化する生態系の挙動を説明する概念図

き、外的攪乱に対し元の状態に戻ろうとする。生態系の復元力*はこの「谷」のサイズ、すなわち傾斜 (slope) と幅 (width) で特徴づけられる。傾斜の大きさは、回復に要する時間に影響する。幅が大きいほど、ビー玉が外へは出にくくなる。ビー玉の移行しやすさは、この谷の復元力と外からの攪乱の強度の両方に依存すると考える。そして、レジーム・シフトは、尾根を越える生態系の移行で表される。

3.2 双安定系のフィードバックメカニズム

達古武沼やシラルトロ湖で見られたように、浅い湖沼では沈水植物群落が多量な「水が澄んだ状態」とアオコが大発生する「水が濁った状態」といった対照的な双安定系が、一定の栄養塩濃度の範囲 (湖水中の全リン量としておおそ $0.05 \sim 0.15 \text{ mg L}^{-1}$) で存在する¹¹⁾。おのおのの生態系には、次に示すような複数のフィードバックメカニズムが働くと考えられている。

【沈水植物群落が多量な水が澄んだ状態】

沈水植物は、根から栄養塩を吸収するだけでなく、水中からも栄養塩を吸収して成長する。沈水植物群落が発達する夏の間、水中の窒素とリンは植物

体の構成成分として存在するため、植物プランクトンが吸収できる水中の栄養塩は減少し、植物プランクトンの増殖は制限される。

沈水植物群落が繁茂すると、植物体が風波の影響を緩和し浮遊物質の沈降を促し、根が底泥を安定化させることで底泥の巻き上げを抑制し、結果的に底泥から水中へのリンの回帰を軽減する効果がある。さらに、植物体が分解する季節、底泥付近では植物体の枯死した有機物が供給されるために脱窒作用が活発になり、水中の窒素を大気中に放出する。このように、沈水植物群落の存在は植物プランクトンが利用する栄養塩を減らし、その増殖を抑制し、自らが成長するための光が透過しやすい環境を創出していると考えられる。

沈水植物群落の複雑で多様な立体構造は、表面積を増やし、それに付着する生物を増やすとともに、細かな空隙などを増やし、それが餌となる有機物をトラップする。そして、捕食者からの隠れ家を提供する。結果として、小動物を餌とする魚類や鳥類なども豊富になり、生物多様性と生物量がともに豊かな生態系が成立する。特に大型ミジンコは、高い効率で水を濾過して植

物プランクトンを食べるために、水質浄化に役立つ生きものであるが、魚にすぐに食べられてしまう。水生植物の複雑な立体構造は、この大型ミジンコが捕食者である魚から身を隠す隠れ家を提供する。このように、沈水植物群落が存在すると、こうしたいくつかの生態系機能が働き、水が澄むことへのフィードバックが働きやすくなる。

【アオコが大発生する「水が濁った状態」】

これとは反対に、いったん植物プランクトンが増え、水が濁った状態になり沈水植物群落が消失してしまうと、底泥からの巻き上げやリンの内部負荷*の増加による栄養塩の供給により、さらに植物プランクトンが増える。アオコを構成するシアノバクテリアの多くは、群体もしくは糸状であるため、動物プランクトンの摂食活動を機械的に妨げる。また、たとえ食べたとしても、

【生態系の復元力】

「レジリエンス (resilience)」、 「回復力」とも言う。生態系が攪乱を受けた後、以前の状態に戻る速度。

【内部負荷】

流入河川など湖沼の外から加わる栄養塩負荷でなく、底泥からの溶出などによる負荷を意味する。



栄養価が低く、毒物質を含む場合がある。よって、被食によって植物プランクトンの現存量はあまり低下しない。さらに、水表面に集積して他の植物プランクトン種の増殖を妨げる。これは、他の藻類より単位リン量当たりに換算して高い濁度環境を創出することになる。そのため、こうした藻類の出現は濁った状態を助長する。

多様な生きものを育み高い水質浄化機能を備えるという点から、浅い湖沼は「水が澄んだ状態」を維持できるように保全・管理することが望ましい。すでに述べたように、浅い湖沼生態系は、ヒステリシスいわゆる履歴効果をもち、非線形に急激に変化する特徴があるため、その保全・管理には以下の困難を覚悟しなければならない。

- (1) 2つの状態の間を移行する変化の予測が困難で、予兆警告のシグナルが得にくい。
- (2) 「水が濁った状態」から「水が澄んだ状態」に戻そうとすると、栄養塩レベルに変化が起きた状態に戻すだけでは不十分で、さらに低下させる必要が生じる。

そのため、いったん「水が濁った状態」になると、その再生には回復の兆しが現れるのを辛抱強く待ちながら、努力を継続する姿勢が求められることになる。

4 湖沼生態系を蘇らせるために

4.1 達古武沼とシラルトロ湖の生態系劣化の原因

2003年から実施されている環境省川路湿原自然再生事業のための調査研究や国立環境研究所の調査研究を通じて、

私たちは達古武沼とシラルトロ湖の生態系劣化の原因を追跡してきた。その結果、達古武沼では沼の南西部の湿地内に過去に大量に投棄された畜産糞尿が大きな汚濁負荷源になっていることが北海道環境研究センターの三上英樹氏らの調査で明らかになってきた¹²⁾。家畜排せつ物については、1999年に「家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」が制定され、5年間の準備猶予期間を経て2004年から家畜排せつ物の野積みや素掘りが禁止されたところである。さらに、シラルトロ湖では沼の北東別荘地からの温泉排水が大きな負荷源として疑われている。

4.2 湖沼生態系再生のためのショックセラピー

富栄養化して劣化した湖沼生態系の再生には、何よりもまず、早急に窒素とリンの負荷源を断つことが先決である。そうしたうえで、少しでもその回復を早めるための方法(ショックセラピー)がヨーロッパで提案され試行されている。

ひとつは、沈水植物が芽生え成長する季節に、思い切って水位を大幅に下げ、沈水植物群落の生育を助ける方法、または、トロール漁などでプランクトン食魚を一時的にでも極端に減らすことで大型のミジンコを増やし、透明度を上げ、沈水植物群落の生育を助けるなどの手法である。さらに、プランクトン食魚のみならず、沈水植物の再生を妨げるコイなどの底生魚やザリガニの除去なども必要になる。経験的に、沈水植物群落(被覆面積×高さ)が湖沼体積の25~30%を占めると「水が澄んだ系」になると言われている。リンの年負荷率が1 m²当たり0.5~2.0 gの範囲の湖沼もしくは湖水のTP(全

リン)濃度が0.08~0.15 mg L⁻¹程度なら効果があるとされる¹¹⁾。大切なことは、どのような手法を用いようと、湖沼の健全性を取り戻すには、流域からの負荷量削減努力をすることなしにはなし遂げることができない、ということ肝に命じていることである。EUでは、「豊富な水生植物が繁茂する水が澄んだ状態」を浅い湖沼のリファレンス(目標)に設定し、2015年までにこれに近づけるように努力している¹³⁾。

4.3 安定領域を大きく保つ努力が重要

レジーム・シフトが、外的攪乱の程度と生態系の復元力の双方の組み合わせに依存して起きることはすでに述べた。カタストロフィック・レジーム・シフトを予防するには、ひとつは外的攪乱の程度を弱めること、そしてもうひとつは生態系の復元力を大きくするような保全管理をすることである。外的攪乱の中には、台風、大雨、洪水、渇水などのようにコントロールすることが困難な確率的な出来事もある。一方、生態系の復元力はそれ自体が捉えにくいこと、それが失われている事実を見落としがちになる。しかし、望ましくないシフトのリスクを減らすためには、低減できる外的攪乱を制御するとともに、復元力に影響する要素を見極め、安定領域を大きく保つ努力が大切になる。湖沼生態系で言えば、

- (1) 地道な栄養塩負荷の削減努力をする
- (2) 流域に手入れの行き届いた広い森林域を確保する
- (3) 流入河川や湖沼への移行域に栄養塩をストックできる湿地や沿岸域などのバッファゾーンを広くする
- (4) 一定面積の沈水植物群落の量を維持する
- (5) 底生魚やプランクトン食魚のス





- トック量を適正に管理する
- (6) 魚介類の水揚げによる栄養塩の除去を保つ
 - (7) 侵略的外来種の侵入を防止する
 - (8) 地域固有の生物相を守る
- ことなどが安定領域を広くすることになり、増加する環境変動に直面している現在の湖沼生態系管理には効果的な方法だと考えられる。

長野県諏訪湖では流域下水道が1979年から運用され、流域から集められた下水は処理されて諏訪湖の流出口に放出されるようになった。以後、湖水中の栄養塩濃度は減少をし続けたが、特に湖の様子に著しい変化は認められなかった。しかし、20年後の1999年にアオコが激減し、透明度が一気に上昇した¹⁴⁾。諏訪湖の事例は、地道な栄養塩負荷の削減努力がいかに大切かを示している。

5 おわりに

淡水域（河川、湖沼、湿地など）は地球の水の約0.01%、地球の表面積で見ても0.8%を占めるにすぎない。しかし、この少ない淡水域に地球上の全生物種の約6%が棲むといわれている。

【生態系サービス】

自然の生態系が人間社会に提供する多様な恵みのこと。国連のミレニアム生態系評価(2005)では、生態系サービスを供給サービス、調整サービス、文化的サービスに区分し、その全体を支える基盤サービスとして生態系の生産や分解などの物質循環をつかさどる生態系機能を位置づけた。

脊椎動物についてみれば、その約1/3が淡水域に棲んでいる。しかし、International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN)¹⁵⁾の発表によると、淡水魚の評価対象種3,481種の37%、両生類6,260種の30%がレッドリストに掲載され、今まさに絶滅の危機にある。

こうした事態を招いた主因は、淡水の生きもの同様に、この少ない水資源にことのほか依存した生活をしている、私たち人間による環境改変にほかならない。そして、自然生態系の劣化は、とりもなおさず私たちへの生態系サービス*（自然の恵み）を低下させる結果を招いている。生きもの生存の現状は、私たち人間の生存への警鐘にほかならない。私たちは、生きものシグナルを真摯に受け止め、将来の世代が、私たち以上に自然生態系の恵みを楽しみ続けることができるように、今、生態系ならびに生物多様性の保全に力を注ぐべきである。

【文 献】

1) Takamura, N., Kadono, Y., Fukushima, M., Nakagawa, M. & Kim, B.-H. O. *Ecol.*

Res., **18**, 381-395 (2003).

- 2) 環境省自然環境局東北海道地区自然保護事務所, 野生生物総合研究所. 平成16年度釧路湿原東部湖沼自然環境調査業務報告書, 2005.
- 3) 岡本実希. 沈水植物の分布とヒシを含めた環境要因との関係: 釧路湿原シラルトロ湖を例に. 東京大学大学院農学生命科学研究科修士論文, 2009.
- 4) http://www.kushiro.env.gr.jp/saisei/shiryu/newsletter/newsletter_02.pdf
- 5) 角野康郎. 陸水学雑誌, **68**, 105-108 (2007).
- 6) 西廣淳, 岡本実希, 高村典子. 陸水学雑誌, **70**, 183-190 (2009).
- 7) <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=8648>
- 8) Takamura, N., Ito, T., Ueno, R., Ohtaka, A., Wakana, I. *et al. Ecol. Res.*, **24**, 371-381 (2009).
- 9) Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C. & Walker, B. *Nature*, **413**, 591-596 (2001).
- 10) Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T. *et al. Ann. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **35**, 557-581 (2004).
- 11) Jeppesen, E., Jensen, J. P., Kristensen, P., Søndergaard, M., Mortensen, E. *et al. Hydrobiologia*, **200**, 219-227 (1990).
- 12) 環境省東北海道事務所. 平成21年度遠古武沼自然再生検討委員会資料, 2010.
- 13) Chave, P. A. *The EU Water Framework Directive*, IWA Publishing, London, 2001, p. 208.
- 14) 花里孝幸. 漁業生産と水質浄化のジレンマ. (高村典子・編. 生態系再生の新しい視点: 湖沼からの提案, 共立出版, 2009, p. 137-142.)
- 15) <http://www.cop10.com/news/000134.html>



高村 典子 Noriko Takamura

国立環境研究所 環境リスク研究センター 生態系影響評価研究室 室長 / 重点研究プロジェクト「生物多様性と生態系機能の視点に基づく環境リスク影響評価手法の開発」リーダー

略 歴: 1979年, 奈良女子大学大学院理学研究科修士課程修了。環境庁国立公害研究所(現・国立環境研究所)入所, 現在に至る。学術博士。2006年から東京大学大学院農学生命科学研究科生圏システム学専攻(連携教授)を併任。

専 門: 陸水生態学 / 保全生態学

受賞歴: 第3回生態学琵琶湖賞(1993年)

著 書: [編著]「生態系再生の新しい視点: 湖沼からの提案」(共立出版) など

