

北海道大沼国定公園におけるアオコの三次元的モニタリングと レクリエーション機能の変動解析

自然保護区に期待されている主な機能は、自然および生物多様性の保護と生態系サービスの持続的な利用である。保護区において有効な保全活動を行うためには、継続的なモニタリング結果に応じた順応的な管理と、ステークホルダーの理解および協力が必要である。しかしながら、水辺のモニタリング活動には、コストや技術面での問題があり、保護することで得られる生態系サービス（便益）の評価が困難であることが、ステークホルダーの理解と協力を得ることの障壁となっている。その為、適切なモニタリング指標の設定とより簡便な調査手法の開発、そして、ステークホルダーが得られる便益を経済的価値として明示することが求められている。本研究では、近年、大沼国定公園において問題となっている「アオコ」に注目し、大沼における植物プランクトン群集の変動をモニタリングすると共に、アオコがレクリエーション機能に与える影響を経済学的に評価することを目的とした。

アオコの発生状況を調べる為に、9つの定点で2019年6月から11月にかけて観測を行なった。観測では、多波長励起蛍光光度計（JFEアドバンテック）を用いた鉛直測定と、バンドーン採水器を用いた表層、中層、底層の三層採水を行い、採水試料を酸洗浄したポリプロピレンボトルに入れ、冷暗所で保管しながら研究室へ持ち帰った。持ち帰った試料の一部をGF/Fフィルターでろ過し、濾紙は冷暗所でDMF中に一昼夜つけ置き、濾紙はスピッツ管に入れて冷凍保存した。残った採水試料を酸性ルゴールで固定して（終濃度2%）、倒立顕微鏡下で藍藻類、珪藻類、渦鞭毛藻類、緑藻類について計数と細胞サイズ測定を行い、植物プランクトンの種組成や細胞密度を算出した。濾紙をつけ置いたDMFサンプルは、ターナー蛍光光度計によって蛍光値を測定し、塩酸を加えて再度蛍光値を測定した。酸添加前と後の蛍光値からクロロフィル *a* 濃度およびフェオフィチン濃度を算出した。冷凍しておいた濾液を解凍し、オートアナライザーで硝酸（NO₃-N）および亜硝酸（NO₂-N）、リン酸（PO₄-P）、ケイ酸（SiO₂-Si）の濃度を測定した。

特にアオコが顕著な東キャンプ場湾内では、小型無人航空機（Phantom4 pro, DJI）を使ってアオコの分布を三次元的に解析した。2019年の9月13日と10月1日の13時に観測を行なった。観測の手順としては、初めに小型無人航空機によって湾内の撮影を行い、撮影完了後すぐに、湾内の45点で現場観測を行なった。小型無人航空機の操縦はマニュアルで行い、オーバーラップ率が60%、サイドラップ率が50%程度になるように経路を設定し、シャッター速度を1/1000、F値が8程度になるように調整して撮影した。なお、本飛行調査に関しては、渡島総合振興局環境生活課および大沼ラムサール協議会事務局の確認の上で行なった。現場観測では、表層水の採水と多波長励起蛍光光度計による鉛直方向の藍藻類のクロロフィル *a* 濃度の測定と検鏡による藍藻類の計数を行い、GPS情報も記録した。得られた、200枚程度の写真をMetashape professionalのSfM処理によって1枚のオルソモザイク画像に合成し、マニュアルで海岸線を設定した。オルソモザイク画像の解析はArcGISおよびQGISを用いて行なった。現場観測で得られた表層水中の藍藻類細胞密度の値を標準化したデータを画像のピクセルデータに紐付けし、最尤法モデルで画像解析を行なった。そして、画像解析で得られた藍藻類の面的確率分布に、多波長励起蛍光光度計を用いて測定した藍藻類の鉛直的分布データを掛け合わせて、三次元的に藍藻類を定量評価した。

経済学的モニタリングとしては、2019年7月から2020年2月にかけて、公園の利用者に対してアンケート調査を行い、仮想評価法 (CVM) を用いて支払意思額 (WTP) を尋ねた。合わせて、環境省が公開している大沼国定公園の利用者数を用いて、アオコが無い大沼が保有するレクリエーション価値を算出した。

水理環境では、水温は8月初旬に最高値 (28.3 度) を記録し、その後は低下した。また、7月末から8月中旬には水温躍層が確認されが、その他の期間は水柱全体で大きな差は見られなかった。栄養塩に関しては、ほとんどの観測点でリンは検出限界未満 ($0.05 \mu\text{mol L}^{-1}$) で枯渇していた。ケイ素は多量に溶存しており、8月中旬以降は $86\text{--}150 \mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲で堅調に増加した。硝酸及び亜硝酸については、検出限界 ($0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$) から $11.65 \mu\text{mol L}^{-1}$ の範囲で変動し、8月下旬に一度増加し、9月に激減、10月に再び増加する傾向が見られた。また、最深点では底層に比べて表層で枯渇していることが確認できた。多波長励起蛍光光度計と検鏡によって得られたデータから、晩春から初夏 (6-7 月) では、珪藻類のうち *Aulacoseira granulata* および *Melosira varians* が優占し、夏には藍藻類である *Aphanizomenon flos-aquae* や *Dolichospermum planctonicum*、*Microcystis aeruginosa* と *Microcystis wesenbergii* が特に優占した。水温が16度を下回る10月下旬からは再び珪藻類が優占した。また、2019年は例年に比べて降水量が非常に少なく、8月中旬まで顕著な渇水状態であった。8月下旬に水温や日照時間などの環境が急激に変化したことや、降水量が増加して湖沼に栄養塩が流入したことがきっかけでアオコが発生したと考えた。

画像解析によって、沿岸域に高密度で藍藻類が存在していることが分かった。これは、アオコの表在性と風向風速が関係していると考えた。9月から12月にかけて小型無人航空機を使って収集した湾内の画像データと、気象庁の風向風速のデータから、大沼で発生したアオコが湖沼の北東部に吹き寄せられる傾向が示唆され、定点観測のデータからは、藍藻類は日中、表層5 m以浅に多く存在していることが明らかなこともそれを支持する。また、これらの結果から、小型無人航空機や多波長励起蛍光光度計などの光学観測機器を用いたモニタリングがアオコ評価に有効であることが示された。

アンケート調査では、有効な回答数は107件で、うち、アオコを知っていた利用者は45%、その中でも大沼国定公園内でアオコを見たことがある利用者は全体の20%未満であった。アオコを知っていたり見たりしたことのある利用者のWTPがより高い傾向にあった。また、全体のWTPの中央値は500円となり、この値と平成29年の利用者数を掛け合わせ、アオコが無い大沼が保有するレクリエーション価値は7億500万円と算出された。加えて、大沼でアオコが頻繁に出現している情報を公開する前と後では、大沼に来たいと思う志望度に有意な差 ($p<0.004$) があり、アオコの増殖によって大沼のレクリエーション価値が低下する可能性が示された。

以上のようなモニタリングによって、アオコが大沼にとって大きなリスクとなることが明らかとなった。近年は、殺藻細菌によるアオコ原因種の抑制や、ヒシモを活用した栄養塩抑制など、環境にも配慮したアオコ防除に関する研究にも注目が高まっている。今後の継続的かつ総合的なモニタリング活動と、その結果に則した対応が必要である。

桑原朋