＜報　文＞

青森県十二湖青池と隣接湖沼の水質比較*

花石　竜治**・菩提寺　誉子***

キーワード　①十二湖　②青池　③イオン組成　④植物プランクトン　⑤呈色機構

要　　旨

青森県十二湖青池の青色呈色機構について解明するため，北側にある青色呈色しない鶏頭場ノ池（けとばのいけ）との水質を比較することとし，2023年4月から10月にかけて毎月調査を行った。その結果，硝酸イオンなどを除く主要無機イオンの組成比は，地点差および季節変動がほとんどなかったが，比較した鶏頭場ノ池では，pHおよび溶存酸素飽和率が高く，植物プランクトンによる光合成が活発であることが示唆された。両者の水質の比較から，青池では水質への植物プランクトンの影響は小さいと考えられ，このことが青色呈色の一因であると結論づけた。

1. はじめに

湖沼や海域の呈色は，単に水辺の風景としてではなく，水質を反映する指標でもあり環境保全の観点からも重要である。現代ではリモートセンシングにより，上空から撮影した画像から水質や生態系が議論されている[1)]。

これらの呈色のうち，青色は最も基本的な水体(water body)の色である。国内の青色湖沼としては，北海道上川郡美瑛町の白金青い池や福島県五色沼湖沼群[2),3)]などが有名である。青森県にも十二湖青池があり，特に新緑の時期には鮮やかな青色を呈することで知られている(図1)。

さて，水体の呈色は一般的には水質中の着色性溶質や懸濁物質が原因と考えられるが，これらが希薄な場合には水分子が赤色光を吸収し，かつ青色光を強調して散乱することにより青色を示す[4)]。この一例と推定されているのが青池であり，光物理モデルによる研究[5)-8)]により，その青色は，上記の水の性質に起因すると推定されている。

前述のとおり，呈色は水質の反映であるが，青池の水質については単発的に調査されたものがほとんどである[9)-12)]。湖沼の水質は，流入河川，降水，湖水の循環および生態系と関係することから，呈色との関連を論じるためには継続的な調査が必要である。

本稿では，青池の呈色機構に関係する水質要因を把握することを目的として，青池および比較対象としてその隣接湖沼であり青色を呈さない鶏頭場ノ池（けとばのいけ，図2）の水質を2023年4月から10月にかけて毎月調査した結果を報告する。



図1　青池（2022年6月8日12:11撮影）



図2　鶏頭場ノ池（2022年6月8日11:40撮影）

2. 調査対象

青池（図1）は青森・秋田両県に跨る世界自然遺産白神山地山麓にある十二湖（図3）の一つであり，津軽国定公園内にあって，青森県西津軽郡深浦町に属する。十二湖は，江戸時代の地震に伴う地滑りにより形成されたと考えられており[13)]，大小 33 の湖沼からなる。青池は，この中の越口ノ池(こしぐちのいけ)湖群の最上位にあり，湖面は海抜 240 m である。青池の湖周囲は 125 m，最大

* Comparison of water quality of Ao-ike Pond and of its adjacent Ketobano-ike Pond in Juni-ko Lakes, Aomori Prefecture

** Ryuji HANAISHI（青森県東青地域県民局環境管理部）Tosei Regional Administration Bureau, Aomori Pref.
*** Motoko BODAIJI（青森県環境保全課）Environmental Conservation Division, Aomori Pref.

水深は 8.8 m で，透明度は全透とされている[14),15)]。青池には流出入河川はなく，その湖水は専ら地下水により涵養されていると推定されている。Hanaishi ほかは，その湖水の滞留時間を14日と推定した[8)]。水温は年間で10 ℃前後であり[16)]，冬季に結氷しない。湖水はこの北に隣接する鶏頭場ノ池に伏流すると考えられている。

鶏頭場ノ池（図2）は，透明度 5.0 m であるが青色を呈しない。その湖水は青池からの伏流水および流入河川由来とされており，冬季に結氷する[13),17)]。

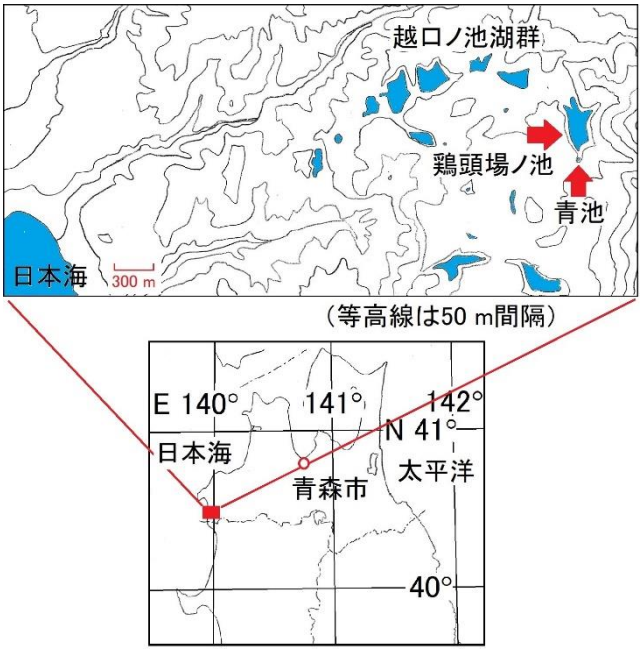


図3　十二湖青池および鶏頭場ノ池の位置図

3. 材料および方法

3.1 試料採取

湖水試料は，表層水を湖岸からバケツを垂下して採取した。採取地点の湖岸は，青池では N 40°33'38.1", E 139°59'5.2", 鶏頭場ノ池では N 40°33'39.5", E 139°59'4.0" であった。試料採取は，2023年4月から10月まで月1回の頻度で，4月17日，5月16日，6月14日，7月25日，8月15日，9月7日および10月12日に行った。

3.2 分析方法

調査項目は，水温，透視度，溶存酸素，pH，電気伝導度 EC，SO_4^{2-}，NO_3^-，Cl^-，NH_4^+，Na^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+} およびアルカリ度とした。

現地で水温，透視度を測定し，溶存酸素を堀場製作所製 WQ-310J を用いて光学式センサ法で定量した。

pH は堀場製作所製 F-53 で（以下，標準品を含めて試薬はすべて富士フイルム和光純薬製を用いた。），EC は同社製 DS-51 で測定した。

無機イオンは，試料を Advantec 製 13HP020CN（ポアサイズ 0.2 μm PTFEメンブレンフィルタ）でろ過した後，サーモフィッシャー製 ICS-1600 により絶対検量線法で定量した。

アルカリ度は JIS K0102-1 15.2.2 により，pH 4.8 までの酸消費量を 0.1 mol/L 塩酸で滴定して測定した。なお，水質の液性が中性の場合，アルカリ度として求めた水素イオンモル濃度が炭酸水素イオンモル濃度に等しいことが知られている[18)]。

4. 結果および考察

4.1 無機イオン成分

青池および鶏頭場ノ池湖水の無機イオン成分組成のうち，NO_3^- 以外は，定量したイオンの範囲でほとんど変動しなかった。なお，NH_4^+ は低濃度であったため，本稿では考察を省略した。図4に，イオン組成比をトリリニアダイアグラムにプロットした。両調査地点の水質はアルカリ土類炭酸塩型であり，既報と同じ見解が得られた[19)]。また，これらの組成比は，對馬ほか(1995)の報告値[10)]とほぼ同じであった。

図5に示すように，NO_3^- 濃度は，青池では季節変動が小さかったが，鶏頭場ノ池では明瞭な季節変動がみられた。青池湖水の NO_3^- は，鶏頭場ノ池湖水に比べて高濃度で，硝酸態窒素 NO_3^--N 濃度に換算すると約 0.4 mg/L であり，中栄養湖の水準であった。一方，鶏頭場ノ池湖水については，夏から秋にかけて低濃度化した。青森県内の例では，十和田湖において硝酸性窒素が春の循環期に全層で一定濃度になり，季節が経過し秋までに浅い層で低濃度化する現象が報告されている[20)]。これは植物プランクトンにより生物の利用可能な NO_3^- が吸収されるためと考えられており，十二湖鶏頭場ノ池でも同じような原因が推定された。

次に，測定した無機イオン成分でイオン組成が説明できるかを検証した。その方法は二つあり，電荷均衡の見地から陽イオンと陰イオンの等量濃度を比較する方法，および EC が測定したイオンで再現できるかを検討する方法である[21)]。前者についてイオンバランスのずれは絶対値で 6 %未満であり，この手引書[21)]の基準以内であった。

後者について，EC は青池で160～210 μS/cm，鶏頭場ノ池で150～180 μS/cm の範囲であり，その再現のため各イオンのモル濃度に極限モル伝導度を乗じて和を取った場合，実測値と再現値の差は 10 % を超えたことがあった。これはイオン強度が高いために希薄溶液の近似が成り立たないからと考えられ，例えば Onsager の式でイオン強度補正を行う[22)]と，EC の実測値と再現値の差は最大で 7 %未満となり，EC がほぼ完全に再現された。以上から，青池および鶏頭場ノ池の湖水中のイオンは本研究

の調査範囲で十分に把握できたと考えられた。

なお，今回調査したイオンはすべて可視領域で有意に光吸収しないことから，呈色に直接的には影響しないと考えられた。

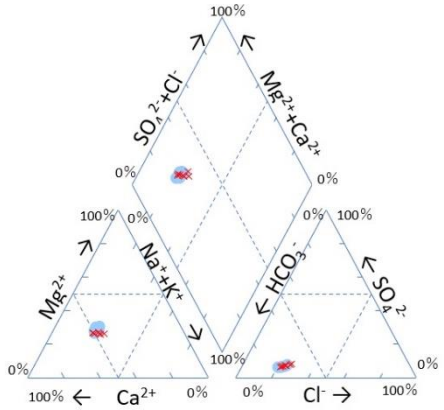


図4　主要無機イオンのトリリニアダイアグラム

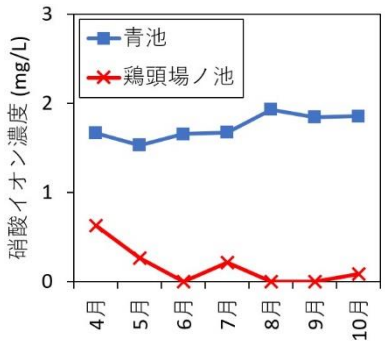


図5　硝酸イオン濃度の季節変動

4.2 pH

図6に pH の季節変動を示す。青池湖水の pH は 7.3～7.6 の範囲で変動し，鶏頭場ノ池湖水の範囲 7.8～8.2 よりも低かった。

前述のとおり，両湖沼では無機イオン組成が NO_3^- 以外はほとんど同一であり，pH に影響を与える要因として，光合成による二酸化炭素の吸収が考えられた[23]。すなわち，鶏頭場ノ池では光合成が活発で，二酸化炭素を吸収し，これが関与する化学平衡で水素イオン濃度が減少することが示唆された。一方，青池では光合成が活発に行われず，pH が鶏頭場ノ池に比べて低く保持されたと考えられた。

4.3 溶存酸素

図7に溶存酸素飽和率の季節変動を示す。調査した全期間で，青池では溶存酸素が不飽和(79～87 %)，鶏頭場ノ池では過飽和(101～120 %)であった。この差の原因は，光合成が活発に行われている鶏頭場ノ池ではその反応に

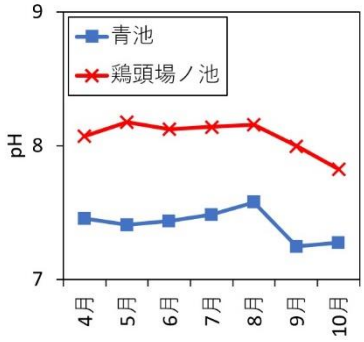


図6　pHの季節変動

より酸素が発生しており，一方，青池では光合成による酸素発生量が少なく，地下水によって涵養された湖水が14日間の滞留時間[8]で入れ替わり，その入れ替わりが大気中の酸素の湖水への溶解速度よりも速いために不飽和になっているからと推定された。

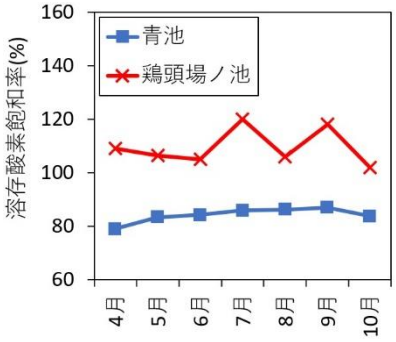


図7　溶存酸素飽和率の季節変動

4.4 植物プランクトンの呈色への影響の考察

ここまでに述べたとおり，本研究で青池と隣接する鶏頭場ノ池の水質を比較して考察した結果，青色を呈しない鶏頭場ノ池では光合成が活発で植物プランクトンの影響が大きく，一方，青池では影響が小さいと考えられた。

植物プランクトンは，その懸濁態粒子が光散乱する。また，すべての植物プランクトンはクロロフィル-*a* を含み，この物質は赤色および青色光を吸収し湖水を緑色に呈色させる。これらの二点により，植物プランクトンは呈色に影響しうると考えられる。

ここで，懸濁物質については，花石ほか[12]が青池と鶏頭場ノ池湖水の可視領域の吸収スペクトルを比較している。青池湖水の吸収スペクトルが純水のものと同一と見なせるのに対して，鶏頭場ノ池湖水は短波長側から長波長側までの広い範囲で吸光度があり，これは懸濁物質による光散乱の効果と考えられると報告している。鶏頭場ノ池湖水の懸濁物質の光散乱のうち植物プランクトンの寄与の大きさについては今後検討の余地があるが，その存在は鶏頭場ノ池における光散乱の一因と推定された。

以上のとおり，青色を呈しない鶏頭場ノ池の水質は植物プランクトンによる光合成の作用を反映したものと考えられた。これに対して，青池の水質には植物プランクトンによる影響が小さく，光合成の作用をほとんど受けていないと考えられた。

青池が青色呈色する理由は，湖水中の着色性溶質や懸濁物質が希薄であることにより，水そのものの性質が現れるからと推定されている[5)-8)]。本研究により，青池は，水質に対する植物プランクトンの影響が小さく，このことが，これらの物質が希薄となる一因と考えられる。よって，青池において植物プランクトンの影響が小さいことが，その青色呈色機構の一因であると結論づけた。

5. 結論

本研究では，青森県十二湖青池とその隣接湖沼の鶏頭場ノ池の水質に関して，以下の知見が得られた。

(1)青池と鶏頭場ノ池の湖水水質は,イオン組成の見地から,NO_3^-以外は,地点差および季節変動が小さかった。また，定量したイオンの範囲で，これらの湖水のイオンを把握できた。

(2)プランクトンの影響を反映すると考えられる NO_3^-，pH および溶存酸素は，青池と鶏頭場ノ池で大きく異なっていた。青池ではその影響が小さく，鶏頭場ノ池では影響が大きかった。

本研究では，これらの水質の観点から二つの湖沼の違いを検討し，また，植物プランクトンが水質およびその光吸収や散乱に与える影響を考察した。その結果，青池の青色呈色の一因は，植物プランクトンの影響が小さいことであるという結論が得られた。

この見解は，これまで光物理モデルにより行われてきた呈色機構推定に対して，水質の観点から新たに論拠を与えるものと考えられた。

6. 引用文献

1)　Zhang Y., Giardino C., Li L.: Water Optics and Water Colour Remote Sensing. *Remote Sensing*, **9**, 818-822, 2017

2)　高貝慶隆, 阿部遼太 : 湖面の青色色彩に関する五色沼と北海道美瑛町青い池の化学的類似性と相違性について，磐梯朝日遷移プロジェクト成果報告書，福島大学理工学群共生システム理工学類，福島，pp. 80-87, 2014

3)　高貝慶隆，遠藤　新，岡本香奈，阿部遼太：五色沼湖沼群の青色要因の調査を目的とする日本各地の青色湖沼との共通点と相違点，磐梯朝日遷移プロジェクト成果報告書，pp. 155-162，福島大学理工学群共生システム理工学類，福島，2015

4)　Kirk J.T.O.: Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 3rd ed., pp. 61-65, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2010

5)　花石竜治，大坂直人，知北和久：青森県・青池の呈色に関する研究:画像解析とモニタリング. 陸水物理学会誌, **1**, 3-23, 2019

6)　花石竜治，大坂直人，知北和久：青森県・青池の呈色に関する研究：モデルの精緻化. 陸水物理学会誌, **2**, 25-45, 2020

7)　Hanaishi R., Chikita K.A.: A Study on the Blue Coloration of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture, Japan: Formulation of a Physical Model in Terms of Radiance and Image Analyses. *Applied Sciences*, **11**, 9231, 2021

8)　Hanaishi R., Chikita K.A.: A study on the coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture, Japan: refinement of the image analysis methods. *Limnology*, **25**, 125-142, 2024

9)　松谷善三，小久保清治：津軽十二湖越口ノ池湖群湖水の溶存化学成分. 日本水産学会誌, **11**, 5-15, 1942

10)　對馬康夫，日野修次，大高明史，齋藤捷一：津軽十二湖湖沼群の水質化学特性. 陸水学雑誌, **56**, 9-18, 1995

11)　花石竜治，工藤志保，野澤直史，佐藤裕久：十二湖青池の呈色機構に関する研究（第一報）. 青森県環境保健センター研究報告, **27**, 36-52, 2016

12)　花石竜治，大坂直人，柴田めぐみ，野澤直史，佐藤裕久：十二湖青池の呈色機構に関する研究（第三報）：光測定結果の解析について. 青森県環境保健センター年報, **28**, 56-62, 2017

13)　鄒　青穎, 山邉康晴, 檜垣大助, 笹川考義, 桐生朋, 沼田修平，古川日咲子，小田桐（白石）睦弥：高密度電気探査を用いた津軽十二湖成因の検証：青池付近を例として. 日本地すべり学会誌, **58**, 109-117, 2021

14)　吉村信吉，木場一夫，尾原信彦，長津一郎：津軽十二湖の湖盆形態（上）津軽十二湖研究(1). 地理学評論, **10**, 968-989, 1934

15)　三上　一，石塚伸一，佐藤真理子，今　俊夫，野呂幸男，対馬和浩，阪崎俊璽，早狩敏男，小山田久美子，高柳和弘，澤山修悦，奈良忠明：青森県の湖沼(I). 青森県環境保健センター研究報告, **3**, 50-59, 1992

16)　大高明史，高橋友宏：津軽十二湖湖沼群・越口ノ池水系の水温環境と河川底生動物の流程分布. 弘前大学深浦臨海実習所報告, **16**, 21-47, 1999

17)　吉村信吉，木場一夫，尾原信彦，長津一郎：津軽十二湖の湖盆形態（下）津軽十二湖研究(1). 地理学評論, **10**, 1091-1115, 1934

18)　日本産業標準調査会 審議：JIS K 0102-1 工業用水・工場排水試験方法―第1部：一般理化学試験方法，日本規格協会，東京，p.33，2021
19)　網田和宏，住吉英治，高松信樹：津軽十二湖湖沼群の水質生成機構に関する研究，日本陸水学会第73回大会 札幌大会要旨集，p.074，2008
20)　花石竜治，渡部陽一，今　武純：十和田湖定点における水深8層の硝酸性窒素の挙動．青森県環境保健センター研究報告，**18**，18-21，2007
21)　環境省地球環境局：陸水モニタリング手引書，初版，(財)日本環境衛生センター 酸性雨研究センター，東京，p.81，2005
22)　釜田淳平，穴澤活郎，坂元隼雄，冨安卓滋：イオン強度補正を施した電気伝導度に基づく陸水分析値の評価法．分析化学，**55**，815-819，2006
23)　庄司博光，野呂幸男，小山田久美子，野田正志，山崎喜三郎，早狩敏男：新井田川上流部における高pH現象．青森県公害センター所報，**7**，105-107，1985