

青森県・十二湖青池の呈色機構研究についての総説

花石竜治

青色湖沼として知られる青森県・十二湖青池についての呈色機構研究を総括した。2016年度に開始された水質調査の結果、呈色理論、およびそれによる画像解析結果を概観した。水質調査の結果から、青池には濁りとなる成分や着色性溶質が希薄で、これが青池の青色を際立たせている原因と考えられた。次に、青池の呈色理論となった「花石-大坂-知北モデル」について解説した。また、画像解析の方法を概説し、初春の湖面全体に日射が入射する場合と、初夏以降に上空の葉の隙間から木漏れ日が入射する場合の画像解析法を整理した。青池の青色呈色の本質は、水の赤色光吸収と青色光を強調する水による散乱であり、水の性質の現れであると考えられた。

Key words: Ao-ike Pond, Blue coloration, Hanaishi-Osaka-Chikita model

1. はじめに

水体(water body)とは、地表に多くの水が集合して形成された物体を指し、河川、湖沼、海洋、池、溪流などが含まれ、その多くが青色を呈する。

この水の青色については、物理化学的にはすでに原因が説明されている。それは、水の分子そのものが赤色光を吸収し¹⁾、また、水が青色光を相対的に強く散乱¹⁾するからというものである(この水の性質については後述する。)

さて、青森県には青色湖沼として有名な十二湖青池(じゅうにこ・あおいけ)がある。青池は、世界自然遺産白神山地の山麓に位置し、青森県西津軽郡深浦町に属する。図1にその画像を示す。青池の湖水は澄んでおり、湖底の最大水深は9.0mで全透²⁾であり、展望台から湖底が見えるほどの透明度である。

青池の呈色機構については、青森県環境保健センターによる研究以前は、水質の陸水学的アプローチ³⁾がなされたが、その機構は科学的に未解明とされてきた。一方、2016年に始まった青森県環境保健センターによる研究は、水の青色に着目し、独自の光物理モデルを提唱し、青池の青色呈色を理論的に再現した。本稿では、この青池研究を概観する。



図1 十二湖青池。撮影は2023年4月29日 11:15(JST)

2. 対象地域

図2に青池およびその隣接湖沼の鶏頭場ノ池(けとばのいけ)の位置図を示す。

青池は十二湖の中で湖面の標高が最も高く、海拔243m、最大水深9.0m、湖面積975m²⁴⁾の小さな湖沼である。湖盆形状は漏斗型⁵⁾とされ、その湖水がもっぱら地下水湧出により涵養され流出河川を持たない閉塞湖である。湖水の水温は年間を通じて10℃台であり、冬季に結氷しない⁴⁾。

青池の湖水が伏流水として流入しているのが鶏頭場ノ池である。その湖面の標高は青池と同じだが、最大水深22m、湖面積41,200m²⁴⁾で、目視では濁っており、青色呈色しない。鶏頭場ノ池には湖岸にある崩山(くずれやま)から河川が流入しており、冬季に結氷する⁴⁾。

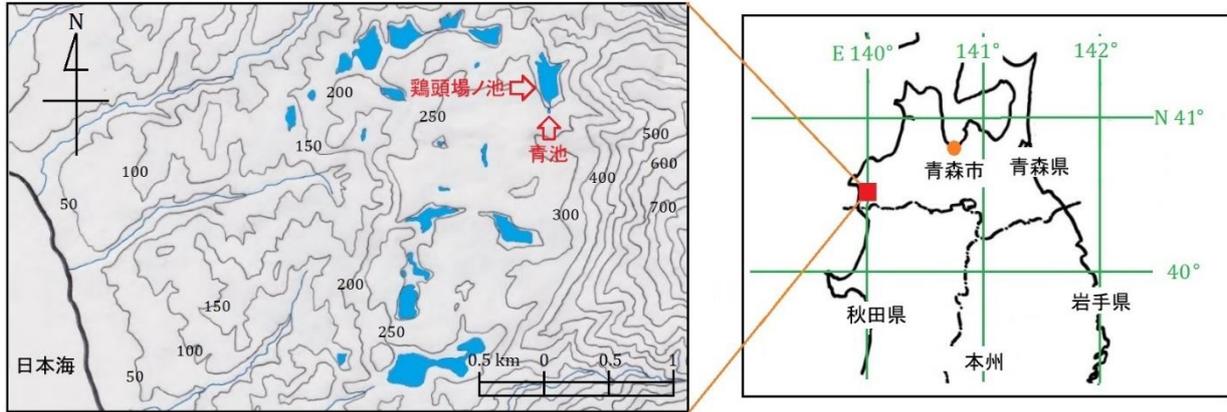


図2 調査対象地域。左の等高線図上の数値は標高(m)

3. 青池の水質について

3.1 湖水の溶質と懸濁物質

(1) 水質に関する俗説について

水体の呈色の原因として一般的にまず考えることは、その水質の化学である。このため、青池が青色に呈色する理由として、青色の物質の存在を考えることは決して奇なことではない。

青池が青い理由の俗説には、溶存酸素(DO)が過剰に含まれて酸素が青いから、あるいは銅イオンが含まれており青いから、というものがあつた。ここで、液体酸素は弱青色を呈し、また、希薄な水溶液中の銅イオン Cu^{2+} は青色を呈する。

花石らは、2016年度に青池湖水の DO 濃度を報告⁶⁾し、また、花石ら⁷⁾は、2023年4月から10月までの毎月において、青池湖水の DO 濃度を調査した。その結果、青池湖水の DO 濃度は決して高くなく、むしろ隣接湖沼の鶏頭場ノ池よりも低濃度であることが示された。

また、花石ら⁶⁾は、青池湖水の誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)による微量元素分析を行い、d 電子の存在が着色の原因とされる遷移金属元素は、 Cu^{2+} をはじめ、ごく微量で、有意な青色呈色には関与しないと示した。

以上から、過剰濃度の DO や Cu^{2+} が存在するから青色呈色するという俗説は否定された。

(2) 懸濁物質 SS について

さて、青池とその隣接湖沼である鶏頭場ノ池で、水質について値が大きく異なる項目は、pH、DO、 NO_3^- および SS である^{6), 7)}。花石らは、この中でも青池湖水における SS 値が、鶏頭場ノ池湖水と比較して非常に低いことを報告している⁶⁾。このことは、青池の高い透明度とも関係していると考えられる。

両湖沼におけるこうした水質の相違は、まず青池湖水の源泉は何か、ということに関連する。前述のとおり、青池には流入河川はなく、湖水はもっぱら地下水湧出によって涵養されている⁴⁾。また湖水の滞留時間は14日と推定され^{8), 9)}、入れ替わりが速く、植物プランクトンの影響が認められず、SSが極めて低い。これに対して鶏頭場ノ池では、植物プランクトンが増殖していると考えられ、pHが光合成の影響で高く⁷⁾、また濁りが強い。

ただし、青池において、SSが間接的・定性的ながらも観測されたことも、Hanaishi et al.¹⁰⁾により報告されている。彼らは、降雨の後の青池で観測された木漏れ日(青池上空を木の葉が覆い、その隙間から入射する日射がつくる湖面上の光軌跡、後述)において、光が湖底に届かないと推定された例を報告している。この原因の一つとして、降水により、湖岸から懸濁物質が湖内に流入し、濁りをもたらした可能性が考えられる。

以上の研究によって、青池では湖水中の SS は概して低い値であることが判明した。このことから、青池では、水本来の青さが際立っていると考えられた。

なお、イオン成分濃度の測定結果および解析は、花石ら¹¹⁾により報告されている。

3.2 実験室および現地における青池湖水の紫外可視吸収スペクトル測定

前述のとおり、青池湖水には呈色に有意に関係する溶質や SS は存在しない。このため、青色呈色させている原因は、水そのものと考えられることができる。

花石ら¹²⁾は、紫外可視分光光度計で10 cm セルを使用し、青池湖水などの紫外可視(UV-Vis)吸収スペクトルを実験室で測定した。その結果、青池

湖水の UV-Vis スペクトルは、光の可視領域において、超純水（比抵抗 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上）のそれにほぼ等しかった。このことは、青池湖水が可視領域において、光学的に純水と同じと見なせることを意味する。

さらに、花石ら¹³⁾は、光ファイバーを青池湖内に進水し、PC からマイコンボード Arduino で制御したミニ分光器により青池湖内における可視領域吸収スペクトルを測定した。その結果、青池の現地においても、実験室における測定結果と同様に、純水と同じ可視領域吸収スペクトルが得られた¹²⁾。

以上の結果から、青池湖水は現地でも、持ち帰って測定を行う実験室でも、可視領域では光学的に純水と同じと見なせると判断された。このことから、青池が、水そのものの性質により青色呈色している可能性が高いと判断された。

4. 呈色理論

4.1 研究以前のモデルとそのアプリケーション

Hanaishi et al.⁹⁾が述べているように、水体の呈色を物理的理論（モデル）に基づいて計算するソフトウェアは 2 種類あり、Mobley が開発した HydroLight¹⁴⁾ と、Hedley が開発した PlanarRad¹⁵⁾ がある。

これらはともに、放射伝達理論(radiative transfer theory)¹⁾に基づくが、違いは HydroLight が 1 次元、PlanarRad が 3 次元モデルであることである。前者は、水体を模した 1 次元的水柱の深さ方向における放射伝達を計算し、後者は水体を 3 次元的に分割してその間の放射伝達を計算する。後者は 3 次元的な水底の影響も考慮もできるが、多くの計算機資源が必要である。

4.2 青池の呈色計算に適した水体の呈色計算モデル：花石-大坂-知北モデル

(1) 新たな呈色モデルが必要な理由と散乱の一次近似

ここでは青池の呈色計算のために新たなモデルが必要であった理由と、そのモデルで採用した散乱の一次近似について述べる。

青池では、展望台から湖底が目視できることから、日射が湖底まで届いていると判断された。このことから、湖底からの反射光も観測点に届く可能性がある。このため、その呈色計算では、湖底の 3 次元形状を考慮する必要があった。

また、光物理モデルには数個の未知パラメータがあり、それらを当てはめにより決定するために、

数十から数百回の呈色計算を、数分間から数時間の時間内で行う計算速度が要求された。

さらに、現代は AI の時代となり、いろいろな科学的推定がそれによって行われている。その大きな利点は、モデルの前提なしに未知数が推定可能なことであろう。しかし、本稿で述べる呈色機構研究では、その機構である光物理モデルそのものに興味があり、それを解明したかったのである。

また、湖底の 3 次元構造を考慮するために PlanarRad を採用していたならば、計算機資源を多く必要とすることから、呈色モデルを調整しながら計算できる余地が小さかったかもしれない。

以上が、既製のソフトウェアによらず、新たな呈色モデルにより青色呈色機構を解明しようとした理由である。

さて、HydroLight も PlanarRad も、2 回以上の多重散乱を考慮できる。多重散乱のうち最も基本的な二重散乱は、佐藤^{16), 17)}の水の分子散乱の計算例では、一次散乱光強度の 10 %程度、観測光を増大させた。

また、懸濁物質によるミー散乱は、その散乱角依存性を表す位相関数（散乱角とは、入射する光の方向と、散乱される光の方向のなす角）が散乱角ゼロに近づくと正の無限大に発散する¹⁸⁾。これは、その状況では、散乱光が直進光に近づくことから理解できよう。このことから、ミー散乱係数が大きく、散乱角が小さい場合、一次散乱だけの考慮は誤差が大きく、一次散乱近似の適用範囲外になると考えられる。

このような課題は残るが、花石らは、青池の呈色計算のために、湖盆形状を考慮しつつ、一次散乱の近似を用いるモデルを構築した。一次散乱と近似したことから、湖底乱反射、水の分子散乱および懸濁物質のミー散乱由来の観測光が重ね合わせとして表現でき、高速演算が可能である。

(2) 花石-大坂-知北モデル

目視でも、デジタルカメラによる撮影画像でも、湖面の呈色については、湖内から発せられ、湖面の点（光射出点）を通り観測点に至る光を、湖面上の光として見ている。この光強度に波長依存性がある場合、湖面のその点が呈色する。

この湖面上の光射出点は、いま考える湖内の点と観測点が定まれば、幾何光学のフェルマーの原理¹⁹⁾によって一意に求まる。そこで、観測点を固定して、この湖内の点を走査すれば、湖面上の光射出点が湖面上に配置される。湖内の各点が観測される光に与える寄与は、一次散乱の近似のもと

では重ね合わせが可能なることから、湖内の点の走査を離散的に行うことにより、単純に離散的でその点に対応した湖面上の光射出点群を得ることができる。

この考えは、光線逆方向追跡法²⁰⁾に基礎を置く。この方法は、観測光の経路を逆に追跡して、光学系における各因子を積算し、観測光の強度を求めるものである。

上記の考えに加えて、後述する数値計算を行い、目視により、あるいはデジタルカメラ撮影画像として得られる湖面上の色の分布を計算することが、花石らの光物理モデルの考え方である。この考え方、およびフェルマーの原理による湖面上の光射出点を求めるための4次方程式の誘導は、研究の早い段階(2019)²¹⁾で公表された。この論文の中で、後述する二次元正規分布密度関数を用いた湖面上の光強度分布の計算法が提案された。また、翌年(2020)²²⁾には、直方体の体積区間の取り方が議論された。これらは一連の研究における呈色モデルについての考え方の提案であることから、2019年および2020年の公表論文の著者の姓を冠して、以後、「花石-大坂-知北モデル」(Hanaishi-Osaka-Chikita model)と呼ぶことにする。このモデルは高速演算が可能であることも長所であり、その理由は、一次散乱の近似を用いることにより、重ね合わせの原理が適用できるからである。

なお、花石-大坂-知北モデルでは4次方程式を例えばDKA法で数値的に解くが、行列計算による解から光射出点を求める方法も存在する²³⁾。

(3) 体積区間の取り方

ここでは、花石-大坂-知北モデルにおいて走査する湖内の点に付随する体積区間(湖底乱反射では湖底の面積区間)の取り方について述べる。

花石-大坂-知北モデルでは、湖内に格子を切り、観測光に寄与する、その体積区間からの散乱光(湖底乱反射の場合には、湖底の面積区間からの反射光)を積算する。

ここで、青池の湖盆は、古くは吉村ら⁵⁾により漏斗状とされ、花石らは、回転楕円体近似を経て、最終的に回転放物面近似を採用した。図3に回転放物面近似の湖盆形状を示す。

近似された青池の湖盆形状はz軸周りの回転で不変な対称性を持つ。このため、花石ら²¹⁾は最初に、体積区間を、z軸からの距離と水平面内の角度の関数として取った。しかし、その後、デカルト座標(直交座標)系で直方体の体積区間を設定した²²⁾。この理由は、観測点を定めたとき、上記

の光学系の対称性が破られ、より計算が直截的に可能な直交座標系の方が式誘導や数値計算が単純であったからである。

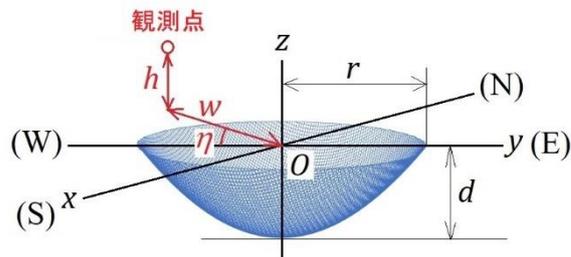


図3 青池の湖盆をモデル化した回転放物面

(4) 湖面上における放射輝度の二次元正規分布の考え

ここでは、実際に湖面上の光強度を放射輝度として計算する方法を記述する。

放射輝度とは、反射や散乱現象を光物理学的に記述するときに見える物理量である。例えば、反射では、後述する完全拡散面の反射面が受ける放射照度と反射面のアルベド(反射率)に応じて、反射光の強さが放射輝度として求まる。また、散乱では、散乱に関与する微小体積区間の大きさ、これが受ける放射照度、散乱光の強さを表す体積散乱関数に応じて、散乱光の放射輝度が与えられる。さらに、後述するように、放射輝度は、目視やデバイスによる観測の際、観測に直接関係する光の強さの物理量となる。

湖内の各点から発せられた散乱光の放射輝度は、Hanaishi et al.⁹⁾および花石ら²⁴⁾の方法で計算でき、それが湖内の水の吸光係数、水の分子散乱係数および懸濁物質によるミー散乱係数からなる消散係数に従って減衰し湖面直下に達する。次にこれがスネルの法則¹⁹⁾に従い屈折し、フレネルの反射係数¹⁹⁾で強度が補正され、湖面直上の点、つまりフェルマーの原理で求められる光射出点へ届く。湖内の散乱点を均一間隔で取っても、フェルマーの原理で座標が決まる湖面上の光射出点は不均一間隔となる。

次の課題は、このようにして求められた湖面上の各点における放射輝度を、連続的な湖面上の放射輝度分布に変換することである。この方法も2019年²¹⁾に提案されたが、理論的検証が試みられたのは2024年^{9), 24)}であった。以上から、花石-大坂-知北モデルは、提案から検証までの期間として5年を要したことになる。

この計算法の考えを説明する。湖面上に不均等に与えられた各光射出点近傍で、光強度が二次元正規分布をすると仮定する。この計算は、湖面上の各光射出点について、その強度に二次元正規分布密度関数を乗じ、これをすべての光射出点について（つまり、湖内の散乱点について）重ね合わせることで、湖面上の光分布に比例する量を取得する。この比例係数は、花石-大坂-知北モデルにおける散乱の体積区間の水平成分（水平面への射影）である。

モデルの数値計算では、湖面上の光分布を次のようにして求める。各光射出点についての湖面直上における放射輝度に、光射出点の座標を期待値とする二次元正規分布密度関数（次元は[長さ]²）を乗じて湖面上の任意の点における放射輝度を算出し、散乱の体積区間の水平成分（水平面への射影、次元は[長さ]²）を乗じて重ね合わせることで、湖面上の放射輝度分布が得られる。

Hanaishi et al.⁹⁾ および花石ら²⁴⁾ は、湖面上の光の放射輝度分布の湖面上における積分値が、湖内の体積区間の水平成分についての積分値に等しいことを示した。

(5) 観測理論^{10), 25), 26)}

ヒトの眼においても、デジタルカメラにおいても、光は、観測するデバイスが受光する照度に比例する物理量として観測する。

照度とは、物体が受ける光の強さを表す物理量である。特に、放射量としては「放射照度」、測光量としては「照度」といい、反射、散乱現象の記述に用いられる。前述(4.2(4))のとおり、反射や散乱光の記述において用いられる。

ヒトの眼においても、デジタルカメラにおいても、光は、観測するデバイスが受光する照度に比例する物理量として観測する。しかし、これらの観測デバイスが観測する光は、観測対象としての常に有限の面積から放射されているのであり、ここに放射輝度（測光量としては、単に輝度という）を考える必要が生ずる。

ここで、光を表す物理量を説明する。光がある面積を単位時間内に通過するエネルギーを放射束という。放射束が点から放射されているとき、その立体角での微分が放射強度である。一方、面積がある光源から発せられる光の放射束の強さを表すのが放射輝度である。その定義は、光が光源の面積区間に直交する方向に放射される場合、放射強度をその面積で微分したものが放射輝度であり、斜めに放射される場合には角度補正の項が入る。

前述の光線逆方向追跡法では、光学系の各段階での放射輝度を計算し、その光経路の微小立体角を乗じて積算し、最終的に受光する放射照度を求める。

Hanaishi et al.^{9), 10)} および花石ら²⁴⁾ は、反射、散乱光の消散係数による減衰、湖面での放射輝度変換および湖面上の放射輝度分布までの計算過程において、放射輝度を用いた。観測される湖面上の光強度として、湖面上の放射輝度分布を観測点から見ていることになる。

放射輝度による観測理論は Szirmay-Kalos の単行本²⁵⁾ に記述されており、青森県による研究でも必要な理論であった。

4.3 水の光吸収および分子散乱：水の性質

青池の研究内容からは離れるが、ここで、水の性質としての赤色光吸収および青色光を強調する分子散乱について簡潔に述べる。

(1) 水の赤色光吸収

水の赤色光吸収は、水の分子振動²⁷⁾に伴うもので、通常、吸収する赤外領域の光の2倍以上のエネルギーを持つ可視領域の光吸収が起こるものである。また、この赤色光吸収は、通常の水（軽水 H₂O）の場合であり、重水 D₂O では認められない。これは、両方で電子状態についてはほとんど同じでも、原子の質量の違いから、振動のエネルギー状態が異なるためである。

(2) 水の分子散乱

前節は量子化学的解釈であったが、一方、水の分子散乱は、Smolchowski-Einstein の揺らぎの理論¹⁾により説明されている。これは水の分子の性質というよりも、水の分子からなる統計力学的集団の性質である。

水の分子散乱は、より物理学的に正確な言葉で表すと密度変動散乱(density fluctuation scattering)であり、光の波長の4乗分の1に比例する強さで散乱光を散乱する。このことから、短波長の光、可視領域では紫から青色の光を相対的に強く散乱する。

4.4 懸濁物質によるミー散乱

ここでは、懸濁物質によるミー散乱について述べる。

前述の水の分子散乱は、光の波長よりも小さな分子に関するものであるが、波長よりも大きな物体は、おおむね波長の逆数に比例する放射輝度²⁸⁾で光を散乱する。これをミー散乱という。懸濁物質が光を吸収しない場合、白く濁って見えるのは、著しく波長依存せずに光を散乱した結果である。

晴れているときに、上空が青いのは散乱光の放射輝度が波長の4乗分の1に比例する、空気分子のレイリー散乱によるもので、雲が白いのは、水滴のミー散乱によるものである。

さて、青池湖水は、SS値が極めて低く、呈色への濁りの影響はないと判断した。このことは、降水後にも青池が青く呈色することと関係している。

ここで、降水後の事例を見てみよう。2022年に青森県西津軽郡地方で豪雨があった²⁹⁾。2022年8月9日の日降水量は、深浦で312.0mmであった。降り始めの8日13時から13日13時までの総降水量は、深浦で433.5mmとなった。これによって、十二湖地域で土砂崩れなどが発生し、甚大な被害があった。しかし、豪雨の翌日に地元の観光ガイドが青池に行ったところ、濁ってはならず、青色を維持していたという³⁰⁾。このことから、青池では地表流による濁りは流入せず、地下水湧出のみで湖水が涵養されており、そのために、豪雨の後でも透明度が保たれていると考えられる。

3.1節で述べたように、降水直後に日射が湖底に届かなくなった現象が観察された¹⁰⁾事例もあったが、その前後の画像からは、おおむねその濁りは弱く、沈殿によって短い時間で消失したと考えられた。

なお、後述するが、湖面画像の解析から、湖水のミー散乱係数がある程度の値として求まる⁸⁾、⁹⁾、²⁴⁾。また木漏れ日画像解析からは、湖面画像解析よりも小さなミー散乱係数が求まっている⁹⁾。このように、ミー散乱係数の評価は今後、詰めるべき課題といえる。

4.5 湖底乱反射

青池の展望台からは、その湖底が見える。このことから、湖底で反射された光が湖外で観測されると判断できる。青池では、湖底には光が届いており(全透)、また湖底における反射率(アルベド)がある程度の値を持つと推定される。

研究の後半から取り入れた完全拡散面(Lambertian)モデルは、その反射光の放射輝度が反射光の方向に依存しないという、もっとも単純な反射面の評価法である¹⁹⁾。

5. デジタルカメラ画像

5.1 ホワイトバランス係数評価法

デジタルカメラは、撮影対象物を感知するセンサーが必ずしもRGB値をその定義のとおり出力する訳ではない。実は、出力したRGB値には正しいRGB値からのずれが起こりうる。これを補

正するのが本稿でいう「ホワイトバランス係数」である。この係数は、デジタルカメラの機種ごとに異なる。

また、デジタルカメラでは、異なった光源を与えたときに同じ色調になるよう設定が可能であり、これを通常、「ホワイトバランス」と呼ぶ。この「ホワイトバランス」の設定に従って、デジタルカメラ内では、おおむねのセンサーの出力データ(生のRAW画像)をJPEGなどの画像ファイルに変換する、いわゆるRAWファイル処理(RAW現像)が行われる。

デジタルカメラを光観測に使用し、理論的に計算された色要素のRGB値を実測値と比較する場合、デジタルカメラにおける「ホワイトバランス」を一定の設定にした上で、正しいRGB値を与えるよう、「ホワイトバランス係数」を求めておく必要がある。この係数を理論計算で算出したRGB値に乘じることにより、実測RGB値と理論RGB値の比較が可能である。

Hanaishi et al.⁹⁾は、RGB値の色標準としてフォーレル水色計(図4)を用いた「ホワイトバランス係数」の決定方法を考案した。その方法は以下のとおりである。色度図上の座標において、各色標準の文献値のRGB座標および純白のRGB値の座標を通る直線を引く。その直線上に、純白からその色標準の観測RGB値へ向かう線分を射影する。この射影値の座標から線形RGB値(相対値)を再構成し、これらから「ホワイトバランス係数」を計算する。

後に花石ら²⁴⁾は、このフォーレル水色計を用いた方法を、RGB値が規定された市販のカラーチャートを用いた方法へと改良した。



図4 フォーレル水色計

5.2 感度係数の計算法

デジタルカメラ画像は放射輝度を観測した結果として、各ピクセル座標において放射輝度に比例した無次元のRGB値を与える。

Hanaishi et al.⁹⁾は、放射輝度から無次元のRGB値を求める係数を、2段階に分けて算出した。

その一つは、カメラに共通な単位輝度あたりの出力値の係数であり、もう一つはカメラに固有の係数である。前者は0.18という出力基準値を与え、ときの基準受光照度から求め、後者は、実際の観測RGB値から輝度に比例した出力値を算出し、そのときの受光照度とカメラの設定値（絞り値、露光時間およびISO感度）を考慮して求める。

後者について、係数の算出が可能である理由は、カメラの基準設定値（絞り値f/2.8、露光時間1/100秒）のときに、CIPA（カメラ映像機器工業会）が規定する方法³¹⁾で求めた標準出力感度が105となるため、この基準設定値のほかにISO感度の標準設定値として100を選択すると、実際の設定値が与える明るさを近似的に計算できるからである。

6. 画像解析

6.1 青池の特徴

(1) 初春と初夏以降の違い

青池の青色呈色は、初春と初夏以降で大きく様相が異なる。

初春には、青池上空に木の葉がなく、日射を遮蔽するものがない。このときには、湖面全体に日光が入射する。4月下旬から5月上旬の晴れた日の正午前に明るく青い湖面（本稿の図1に例を示した）がみられるのは、この場合である。

これに対して、初夏のころには、湖面上空に木の葉が茂り、青池へ入射する日光がほとんど遮蔽される。この時期の晴れた日の午後には、青池に光の筋が見える。これは、青池上空の木の葉の茂った隙間から木漏れ日が青池湖内に入射したものである。これらの2パターンについて、図5に状況を示す。

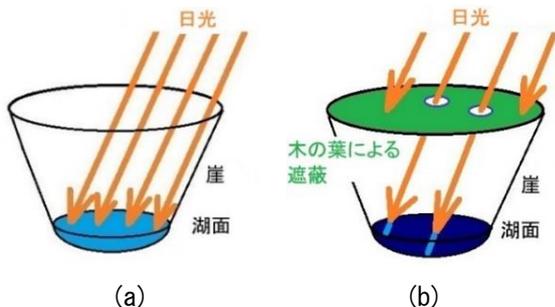


図5 (a) 初春および(b) 初夏の場合の日射の概念図

(2) 直達日射のみが入射するという近似

次に、青池の湖面への日射が主に直達日射であることについて述べる。

これは、青池湖面呈色のシミュレーションの研究過程で明らかになった²⁴⁾ことであるが、青池の近傍にあり比較的、四方が開けている物産館では、日射の照度は、青池の湖岸で測定した値よりも高く出る。この理由は長い間、不明であったが、2024年公表の成果²⁴⁾では、青池の青色呈色には直達日射が主に寄与していると判断された。

日射は太陽光からの直達日射と、大気中での散乱現象を介して降り注ぐ散乱日射³²⁾からなる。日中に、建造物の北側の窓でも明るいのは、散乱日射が有効だからである。散乱日射がなければ、空の色は、太陽の位置以外は、真っ黒になるはずである。我々は、晴れの日に向で影ができることを認識しているためか、晴れた日は直達日射がほとんどと誤解しがちであるが、散乱日射はかなり強い。

つまり、物産館では比較的開けている地形であることから、直達日射のほかに散乱日射が多く寄与し、これらが水平面全天照度として測定されている。このことから、物産館で測定された照度を直接的に太陽高度補正して法線面直達日射照度を求めることはできない。その代わりに、この測定値と太陽高度などから、水平面散乱日射照度および法線面直達日射照度を求めるべきであり、この計算操作を「直散分離」³²⁾という。

青池の場合、湖岸の周囲に崖があり、その高さは数十m、崖の勾配は数十度と思われる。このことから、青池では、図5で示したように、主に直達日射だけが入射する。厳密に言えば、湖周囲の崖の傾きよりも高い入射角のわずかな散乱日射が直達日射とともに入射し、呈色に関与しているということである。

(3) 呈色シミュレーションのモデル系としての青池

青池の湖底は、吉村が報告したように、漏斗状をなしており⁵⁾、湖水は地下水により涵養されている⁴⁾。青池の湖盆形状が単純にモデル化でき、濁りが希薄であるために湖底乱反射および水の分子散乱を考慮する必要がある。また、時に懸濁物質によるミー散乱が起こりうることから、まずは散乱の一次近似が試行できる。このように青池は、その呈色の機構が「未解明」で、かつ湖沼の呈色研究のモデル対象といえるほど魅力的なフィールドであった。

6.2 青池画像：初春

(1) ホモグラフィ変換行列について

この変換行列によって、湖面上座標は画像のピ

クセル座標に変換される³³⁾。一般的に、3次元座標は、透視投影行列によって画像のピクセル座標に変換される。ホモグラフィ変換行列はその変換行列の一例で、平面上の座標をピクセル座標に変換する数学的表現をいう。

(2) ホモグラフィ変換行列の算出法

Hanaishi et al.⁹⁾は、青池の観測点から、その方向をデジタルカメラで撮影した場合、展望台の柵が画像に写ることを利用して、青池ならではのホモグラフィ変換行列算出法を考案した。

その原理は次のとおりである。あらかじめ柵上の点の3次元的位置関係を求めておく。次に観測点から柵上の点を見たときの延長線上の湖面上の点を計算で求める。ここで、観測点も、柵上の点も3次元座標が既知であるから、延長線上の湖面上座標が一意に求まる。この柵上の点と湖面上座標は、画像上で同一のピクセル座標に写っている。このことから、湖面上座標とそれに対応したピクセル座標の対応が求まることになる。この対応関係を、ホモグラフィ変換行列の未知数の個数の半分(4個)以上、取得して、DLT(Discrete Linear Transformation)法などの数学的方法³³⁾により計算すると、ホモグラフィ変換行列が求まる。

Hanaishi et al.⁹⁾は、ホモグラフィ変換行列決定において、Visual Basic(VB)と表計算ソフトExcelを用いた。まず、VBで自作した画像解析アプリケーション上で、柵上の点をクリックすることで、湖面上座標とピクセル座標の対応関係を求めた。Excel VBAでは、必要に応じてOpenCV関数³⁴⁾を用いてC言語で記述したDLLを使い、ホモグラフィ変換行列を求めた。OpenCV関数を使用するコードはC言語あるいはPythonで記述することが必要なため、この計算部をDLLとした。

(3) 湖面画像解析法

湖面画像解析では、デジタルカメラ設定に対応した明るさの係数を考慮しながら、湖面画像から線形RGB値を湖面上座標とともに求めた。そして、それらを、未定のパラメータ(湖底反射率、ミー散乱係数など)を含んだモデル式で計算した値と比較し、計算値の定数倍が実測値を再現するようにモデルパラメータ値を選択した。

このモデルによる当てはめでは単にパラメータ値を合わせているのではないかという意見もあった。そこで、「当てはめにより得られたモデルは正しい」という命題について考察する。

モデル式がパラメータ値を含めて正しいならば、上記の当てはめは妥当である。このことは自明で

あり、ゆえに、当てはめがよく行われることは必要条件である。しかし、その逆のモデル式が正しいという十分条件は、必ずしも成り立たないであろう。誤ったモデル式でも当てはめがなされる可能性はあるのである。これはモデル研究の弱点である。しかし、この問題点を含みつつも、物理現象のモデルによる機構説明は価値があり、またそれ以外に機構の解明方法がない物理現象もあると考える。

そこで、このモデルの妥当性を確認するために、異なった位置から、異なった時刻に撮影した青池画像を同じモデルで解析できるか(モデルに普遍性があるか)、「計算値の定数倍」の定数が1に近い(モデルに定量性があるか)について、吟味する必要があった。

これらについては、花石ら²⁴⁾に一部が記述されたが、そこでモデルの普遍性および定量性はおおむね達成されたと考えられる。今後は、これらの普遍性および定量性を、より広範囲に、そして確実に示す研究が必要と考えられる。

(4) 青池が青い理由

2024年公表^{9), 24)}の成果までに得られている結論では、青池の青色呈色は、次の2点が大きな原因と考えられている。

- 1)水中を湖面→湖底(反射)→湖面の経路で進む光が、湖底で乱反射されるとき、これに伴って水による赤色光吸収が起こり、残った青色光が観測される。湖底そのものが青いわけではない。
- 2)観測される光が水の分子散乱で、水中を湖面→水中(散乱)→湖面の経路で進むときに水によって赤色光が吸収され、青色光が残る。同時に青色光を強調して散乱する水の性質から青色光が強く散乱され、結果として濃い青色が見える。

すなわち、青池が青い理由は、「青色の物質」が存在する、というより、水が青いから青く見える、ということである。「青色の物質」とは水そのものであった。

なお、懸濁物質によるミー散乱は、その係数が湖面画像解析により一定値として求まる^{8), 24)}。しかし、後述する木漏れ日画像解析ではより小さな値となる⁹⁾。この評価は今後の課題でもあり、現在もミー散乱の有無は断定できない。現段階で確からしいことは、計算上、ミー散乱でも、光が水中を湖面→水中(散乱)→湖面の経路で進むとき、水の光学的性質である赤色光吸収により、「青白色」を与えることである。この青白色は、湖底乱反射や水の分子散乱による青色とは異なっている。

ミー散乱係数の大小、つまりミー散乱の青色呈色への寄与の大小は、撮影画像のデジタルカメラ内の処理方法に応じて変動する可能性^{8), 24)}もあり、今後の課題の一つである。

6.3 木漏れ日画像：初夏以降

(1) 木漏れ日とは

6.1節で述べたように、木漏れ日とは湖面上空の木の葉の茂みから漏れて入射した光の筋である。図6にその例を示す。



図6 十二湖青池における木漏れ日。撮影は2021年6月5日 13:58 (JST)

(2) 木漏れ日軌跡付近の RGB 積分値の算出と解析

Hanaishi et al.¹⁰⁾ は、木漏れ日軌跡に直交する方向に沿って線形 RGB 値を積分し、それを木漏れ日軌跡の湖面上座標とともに、花石-大坂-知北モデルで当てはめる方法を考案した。

この方法では、木漏れ日画像の光軌跡における RGB 値の相対的な強弱を与える散乱の強さ、および光軌跡の末端の湖底乱反射の強さから、モデルパラメータ値を推定した。

ここで、木漏れ日画像解析の特長を述べる。

樹木の葉による日射の遮りがない初春の湖面画像解析では湖面全体の RGB 値を解析し、湖底乱反射と散乱による色調の重ね合わせを行った。この結果を基に、これらの寄与を分離する。これらの二者は、湖面上の分布に違いがあることから、数値解析で分離可能であった。

一方で、木漏れ日画像解析では、その光軌跡において湖面に光が入射し湖底に届くまでは散乱光が、光軌跡の末端である湖底付近では湖底乱反射光が映る。これらの二者が解析前から画像上で分離しているため、モデルによる当てはめの精度がよかった。このことは、木漏れ日画像解析の大き

な利点である。

(3) 木漏れ日画像解析から得られたパラメータ値と課題

木漏れ日の光軌跡に対して与えられた積分値は、モデルによってよく再現できた。

この解析方法で求めたモデルパラメータ値は、初春の画像から求めたものと完全には一致しない^{8), 9), 24)}。これらを比較検討することも、今後の課題である。ただし、同じ日に、解析に耐えられる湖面全体の画像と木漏れ日画像の両方を得ることが困難であるという本質的な課題もある。

7. おわりに

青森県・十二湖青池の青色呈色研究について、数式を使わずに概観した。内容を要約すると、以下のようになる。

- 1) 青池の水質を調査した結果、青色呈色には着色性溶質や濁りによる影響がないことが分かった。
- 2) 青池湖水の光学的性質は可視領域では純水に近いものであり、このことから、その青さは水の光学的性質（赤色光を吸収する性質と青色光を強く散乱する性質）に帰せられると判断された。
- 3) 青池研究に最適な光物理モデル（花石-大坂-知北モデル）を考案した。
- 4) モデルによる研究を進めるために、湖面画像の解析法、デジタルカメラの性能評価などを新たに確立した。
- 5) 上記3)と4)により、湖面画像を解析して、モデルパラメータ値を決定し、それによって青色呈色機構を推定した。その結果、青池は、水の光学的性質により青く呈色すると考えられた。
- 6) 湖面画像について、植生の季節変化として現れる木漏れ日画像の解析法を提案し、花石-大坂-知北モデルによって木漏れ日の光軌跡を再現できた。得られたモデルパラメータは、上記5)により得られたものと相違もあり、これは今後の課題である。

本研究の中心は、モデルの確立とその検証であった。6.2(3)節で述べたように、その普遍性と定量性は、ある程度確認したものの、現段階では完全ではない。これらの問題はモデル研究に必ずつきまとうものではあるが、青池の呈色研究にはモデルによる方法が欠かせない。今後、いろいろな工夫を重ねて、この課題を解決し、青池が青い理由を完全なものにできればと願う。

謝 辞

青森県環境保健センターが行った青池研究では、多くの方々にご協力、ご指導をいただきました。研究の初期には、国立環境研究所(当時) 田中 敦先生、鹿児島大学(当時) 古里栄一先生から有益な助言をいただきました。そして、論文投稿や学会発表では、陸水物理学会、陸水学会および水環境学会の皆様にお世話になりました。特に、陸水物理学会では、建設的かつ暖かい雰囲気、また熱心な議論で学会発表をさせていただきました。

青森県環境保健センター内(当時)では、敬称を略しますが、蝦名 章、工藤真哉、佐々木守、神 毅統、貝森優希、一戸重文、野澤直史、大坂直人、佐藤裕久、山本明美、工藤志保、柴田めぐみ、対馬典子、川越敬治、菩提寺誉子、白銀ゆい、長内志保美、その他の多くの方々からご協力をいただきました。特に、蝦名 章氏には、青森県環境保健センターにおけるセンター内ベンチャー制度研究を立ち上げ、この研究の道を拓いていただきました。

研究の初期から、北海道大学北極域研究センター 知北和久先生には、数式誘導から論文原稿作成に至るまでの研究の細部までご指導いただき、貴重な研究の機会と研究に対する情熱を分けいただきました。知北先生のご指導なくして、これまでの青池研究の進展はありえませんでした。ここに記して厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1)Kirk JTO : Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems.3rd ed.,Cambridge University Press, Cambridge,UK,2010
- 2)三上 一,他: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
- 3)高松信樹,他:十二湖青池の呈色機構に関する一考察.日本陸水学会要旨集,3C21,2008
- 4)大高明史,他:津軽十二湖湖沼群・越口の池水系の水温環境と河川底生動物の流程分布.弘前大学理学部附属深浦臨海実習所報告,16,21-47,1999
- 5)吉村信吉,他: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
- 6)花石竜治,他: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
- 7)花石竜治,他:青森県十二湖青池と隣接湖沼の水質比較.全国環境研会誌,49,216-220,2024
- 8)花石竜治,他:青森県・青池の青色呈色に関する研究:画像のRAWファイル使用による解析.陸水物理学会報 第44回研究発表会(2023 新潟大会)講演要旨,14-15,2023
- 9)Hanaishi R et al. : A study on the coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture, Japan: refinement of the image analysis methods.*Limnology*, 25,125-142,2024
- 10)Hanaishi R et al. : 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
- 11)花石竜治,他:青森県・十二湖青池の水質について:イオン成分濃度の解析.青森県青森環境管理事務所環境調査研究課年報,1,60-65,2025
- 12)花石竜治,他: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)花石竜治,他:十二湖青池の呈色機構に関する研究(第二報):自作した吸収スペクトル測定装置のハードおよびソフトウェア.青森県環境保健センター年報,28,51-55,2017
- 14)Mobley CD : Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters.Academic Press,New York,USA,1994
- 15)Hedley J : A three-dimensional radiative transfer model for shallow water environments.*Optics Express*,16,21887-21902,2008
- 16)佐藤信也:純水の透明度の計算画像による推計.陸水学雑誌,81,119-136,2020
- 17)佐藤信也:純水の透明度推計のための水分子による光の散乱のn次近似式の誘導及び三次近似による推計.陸水学雑誌,83,171-195,2022
- 18)Petzold TJ : Volume scattering functions for selected ocean waters.In:Tyler JE (ed) *Light in the Sea*.Hutchinson & Ross,Dowden,USA,1977
- 19)矢田貝豊彦:光学,朝倉書店,東京,2017
- 20)牛山善太,他:シミュレーション光学—多様な光学系設計のために.東海大学出版会,秦野,2003
- 21)花石竜治,他: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
- 22)花石竜治,他: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
- 23)多田村克己,他:水上および水中照明イルミネーション.照明学会論文誌,79,385-391,1995
- 24)花石竜治,他:RAWファイルの画像解析に基づく青森県・青池の呈色機構.陸水物理学会誌,6,3-27,2024

- 25)Szirmay-Kalos L : Monte Carlo Methods in Global Illumination Photo-realistic Rendering with Randomization.VDM Verlag Dr. Müller Aktiengesellschaft & Co. KG,Saarbrücken,Germany, 2008
- 26)Horvath H : Basic optics, aerosol optics, and the role of scattering for sky radiance.*Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*,**139**,3-12,2014
- 27)Braun CL et al. : Why Is Water Blue?*Journal of Chemical Education*,**70**,612-614,1993
- 28)杉森康宏,他 : 海洋環境光学.東海大学出版会,東京,1985
- 29)青森県河川砂防課 : 令和4年発生災害の概要.
<https://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kendo/kasensabo/2022hasseisaigai-gaiyou.html> (2025年9月7日アクセス)
- 30)東奥日報社 : 東奥日報,2022年9月3日朝刊,東奥日報社,青森,2022
- 31)CIPA カメラ映像機器工業会 : CIPA 規格(2020): CIPA DC-004-2020 デジタルカメラの感度規定.
https://www.cipa.jp/std/documents/download_j.html?CIPA_DC-004-2020_J (2025年8月27日アクセス)
- 32)宇田川光弘,他 : 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定.日本建築学会論文報告集,**267**,83-90,1978
- 33)Hartley R et al. : Multiple View Geometry in Computer Vision.2nd ed.,Cambridge University Press, Cambridge,UK,2003
- 34)OpenCV team : <https://opencv.org/> (2025年8月27日アクセス)