

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

花石竜治 大坂直人 柴田めぐみ 野澤直史 佐藤裕久

十二湖青池の青色呈色機構についての続報で、光測定結果に関する報告である。青池湖内の実地と実験室に持ち帰った湖水および超純水について、可視領域の吸光係数のスペクトルが構造・強度ともにほぼ一致し、赤色光領域で吸光係数が高い結果が得られた。また、この水の吸光係数により透過光の青色色調を再現できた。次いで 3 色カラーセンサーを水深 2.5 m まで沈め、赤色光強度比が深さとともに減衰する結果が得られた。その結果を水の吸光係数をもとに解析したところ、得られた赤色素子の分光感度特性のパラメータにより光路長 10~20 m では赤色光がほとんど消失し、透過光は青色およびその半分程度の強度の緑色光となることが示された。以上から、青池における湖底での光の反射を条件とすれば、湖面に入射し透過・湖底での反射・透過・射出を経て観測される光は青色を呈すると推定され、青色呈色の原因は水による赤色光吸収という仮説を支持する結果が得られた。

Key words: Aoike Pond, Lake Juniko, Coloration with blue color, Absorption spectrum

1. 緒言

津軽国定公園内を構成する青森県西津軽郡深浦町の十二湖の青池 (あおいけ、図 1 および図 2 参照) は透き通るような独特の青色を呈する。青池の青色呈色機構については、近年では高松ら¹⁾により研究がなされ、そこでは「水の吸収機構を基調とし、レイリー散乱が関与」と結論されている。また、高貝ら²⁾は、青池は極めて透明度が高いと指摘し、総説³⁾で、湖沼の青色呈色の原因と考えられる因子を分類している。

著者らの 2016 年度の研究⁴⁾では、青池と、これに隣接する「青くない」鶏頭場ノ池 (けとばのいけ) の湖水について化学分析を行い、青池湖水には、着色性の溶質や懸濁物質は極めて希薄という結果が得られた。このことから、青池の青色呈色は、鉍物微粒子由来と推定されている福島県五色沼^{2),3),5),6)}や北海道「青い池」^{2),5)}とは違って、湖水水質中の懸濁物質以外の要因が関与していると考えられた。

そこで、青池の青色呈色の原因は、水の光吸収によるものと推定し、光測定を青池実地や実験室内で実施し、その結果を解析したので報告する。

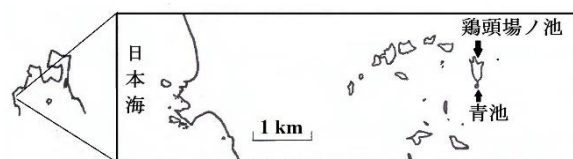


図 1 青池等の位置図



図 2 2017 年 5 月 2 日 11:35 の青池画像

2. 方法

2.1 光吸収スペクトル測定

(1) 光吸収スペクトル測定の意義

青池の三上ら⁷⁾の水質調査で、透明度が全透と報告されていることと、湖底は灰白色を呈する岩石 (十二湖凝灰岩と推定^{8) -10)} からなると考えられること

から（図2参照）、湖底での反射の効果が大きいと想定された。

よって、湖面に入射した光が、湖内を透過して湖底に達し、反射され、さらに透過して湖面から射出し、観測されると考えられた。

それゆえ、青池の呈色を論じるためには、光の湖内透過の過程での光吸収を考慮することが不可欠であり、そのためには青池湖水の光吸収スペクトルの測定が必要である。

実験室で測定できない青池湖水の光挙動や、周囲の地形、太陽光強度およびそのスペクトルなどの因子が反映される可能性があることから、湖水を持ち帰っての室内実験の他に、青池実地の湖内において測定を実施した。

(2) 青池実地における光吸収スペクトル測定

測定は花石らが報告¹¹⁾した自作の測定装置により、2017年7月6日11時台に行った。これは、水深48 cmと湖面直上での光強度スペクトルを測定できる装置である。青池展望台から全長5.4 mの釣り竿でLANケーブルにより装置を垂下し、同時にマイコンボード Arduino Uno とミニ分光器（浜松ホトニクス C12880-MA）を接続した。

(3) 実験室内での紫外可視吸収スペクトル測定

湖水水質検体の採取は2017年7月6日に行った。採取点を、青池は展望台直下、鶏頭場ノ池は湖岸の北緯40.5623度、東経139.9838度（世界測地系）とし、それらの表層水を検体とした。検体は、現地から実験室内までポリカーボネート瓶に入れて輸送し、採取即日に測定し、併せて超純水を測定した。

分光光度計は、島津製作所 UV-1800 を用いて、波長200 nmから900 nmまでを、光路長10 cmの石英セルで、空の石英セルを対照として測定し、吸光度から吸光係数を求めた。

2.2 3色カラーセンサー法による測定

測定は2017年9月1日に行った。

実地での光吸収スペクトル測定は光ファイバの長さの制限から、水深48 cmまでであるので、それより深い層（水深2.5 mまで）での実地測定をこの3色カラーセンサー法で行い知見を補完した。

花石らが2016年度に報告した自作装置⁴⁾を改良し、図3に示すようにセンサー下方に金属製の鎖を装着し、水深によらずセンサーが上を向くようにした。マイコンボード Arduino Uno を介したセンサー（浜松ホトニクス S9706）とPCとの通信は、鈴木の方法¹²⁾に加え Microsoft Excel VBA マクロにより行った⁴⁾。

青池実地では、項2.1(1)と同様に、展望台から釣り竿とLANケーブルにより、青池湖内にセンサー部を垂下し、通信を兼ねた。

この方法では、赤緑青 (RGB) の3色の色別強度が出力されるが、その強度の絶対値はセンサーの傾きなどの影響を受けるので、この影響を相殺するため、 $R:G:B=R/G:1:B/G$ を10回繰り返し測定し、算術平均を結果とした。

なお、3色カラーセンサー法におけるRGB値は赤緑青色の各色素子の出力値としての実測値から求めたものであり、光吸収スペクトルから算出したRGB値（RGB表色系の値）とは定義が異なる。

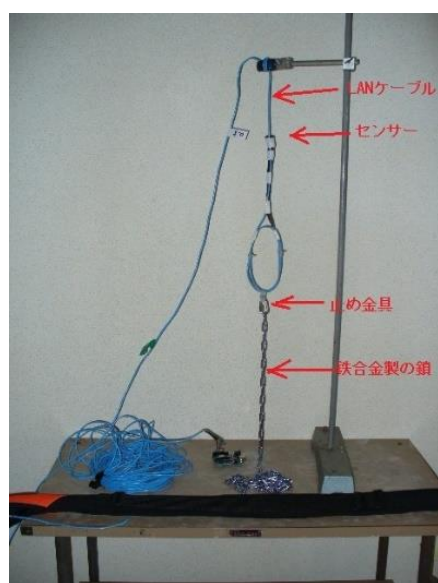


図3 3色カラーセンサー光測定装置

3. 結果

3.1 光吸収スペクトル測定

(1) 青池実地における測定結果

測定時の太陽高度が約72度¹³⁾であり、湖内での見かけの太陽高度は屈折により約77度と推定できた。ここで空気に対する水の相対屈折率を1.333とした。

測定時は散乱日射¹⁴⁾の条件であり、この場合、全天からの放射を考える必要がある。しかし、上方を向いた光ファイバ受光部の有効角度が±20度¹¹⁾であったことから、真上からの放射光が観測されたと考え、水深48 cmを光路長として吸光係数（単位： m^{-1} ）を計算した。図4に結果を示し、その下部に波長に対応する色を併記した。

(2) 室内における測定結果

図4に室内測定の結果を併記した。

図5に水の吸光係数の文献値¹⁵⁾と今回の超純水

の実測値の比較を示した。

前項で述べた実地での測定は自作の測定装置で行ったが、吸収スペクトル算出過程において波長 550 nm 付近の吸光度で強度比を取って対数変換しているため、この因子が不定のバイアスとなった。よって、湖水検体の室内測定を実施し、この不定因子を補い精密なデータが得られた。

(3) 青池実地と実験室内の各試料との測定結果の比較

図 4 に示したように、青池実地光吸収スペクトルと青池湖水および超純水の室内測定の結果は、表示した可視領域で、ほぼ一致した。よって、青池湖水の可視領域の光吸収は、水のそれと同一と判断した。

青池実地での測定については、項 2.1(1) で述べたとおり、室内測定で得られる結果以外の知見が得られる可能性があるため、その測定を企図した段階で想

定した。しかし、実地で得られた光吸収スペクトルは、花石らが報告¹⁴⁾したように、光源として用いた現地の太陽光のフラウンホーファー線も相殺された。また、前述のとおり、実験室内での青池湖水および超純水の測定結果と、ほぼ同一であった。したがって、青池の水質中の光挙動に関して、実験室における測定手段により計測できない要因は存在しないと解釈された。

鶏頭場ノ池湖水については、スペクトルにバイアスが重畳しており、これは前報⁴⁾で述べた浮遊懸濁物質 (SS) の影響と考えられた。

図 5 で、水の吸光係数文献値¹⁵⁾は、積分球を使用した厳密な測定法によったとされる。本論文の結果は、文献値とよく一致したので、分光光度計を用いる方法により評価に耐えうる測定値が得られると考えられた。

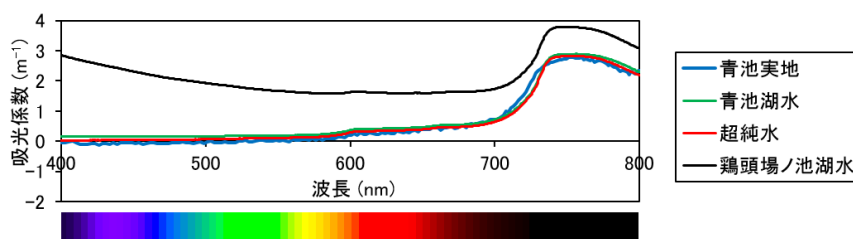


図 4 青池実地での湖内光吸収スペクトルと室内測定で得られた各試料の光吸収スペクトルとの比較

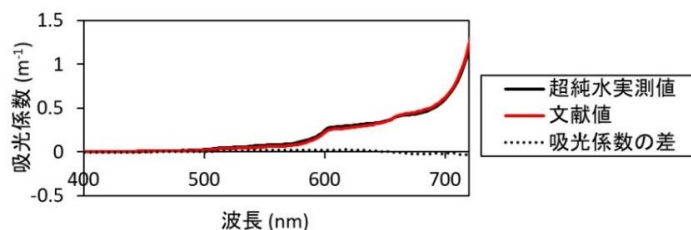


図 5 超純水の光吸収スペクトル実測値と文献値との比較

3.2 3色カラーセンサー法による結果

表 1 に結果を示した。水深が深くなるにつれて緑色光強度に対する赤色光強度比が減衰し、青色光強度比は漸増する傾向であった。なお、測定条件は直達日射¹⁴⁾であり、太陽高度 θ は約 55 度¹³⁾であった。

表 1 3色カラーセンサー法による測定結果 (RGB はそれぞれ赤緑青を示す)

水深 (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
時刻	12:27	12:25	12:22	12:17	12:14
R/G 実測値	0.87	0.67	0.58	0.53	0.49
B/G 実測値	1.12	1.11	1.07	1.14	1.15

4. 考察

4.1 光吸収スペクトル測定

水は赤い色の波長領域で吸光係数が大きく、青池湖水を透過した光の波長成分のうち、強く吸収されない青と緑の色が透過光として観測されると考えら

れた。

水の吸光係数から、光路長 9 m および 18 m の場合（青池の最大水深が 8.8 m⁸⁾ であり、湖底反射による往復の光路長を考慮）、直達日射の太陽光スペクトル¹⁶⁾ を仮定して、JIS 法^{17),18)} により透過光の色調計算を行った結果を図 6 に示した。

図 6(a) では、画面表示前の sRGB 値¹⁸⁾ として R=7, G=155, B=179、(b) では R=0, G=98, B=176 であった。なお、PC での取り扱いのため RGB 値を 2⁸-1=255 で規格化して表記した。G（緑）と B（青）の中間色は「シアン」と表記されるが、計算結果 (b) 光路長 18 m では、G が B の約半分であり、「青」と「シアン」の中間的な色調であった。

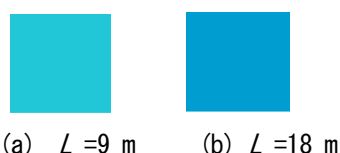


図 6 水の吸光係数から計算した色調（L：光路長）

4.2 3 色カラーセンサー法の測定

(1) 3 色カラーセンサー法測定結果の解析方法

前項 4.1 で「青池における光吸収＝水の光吸収」と判断したので、この見地から、3 色カラーセンサー光測定結果の解析を試みた。

解析の目標を、3 色カラーセンサーの赤色光素子の分光感度ピークの長波長側を規定するガウス関数の標準偏差 a の再現とした。

上記のパラメータ a の統計的推定を行った理由は、その波長領域（赤色）において水の吸光係数が高いという重要性からである。

赤色光素子の分光感度ピークから長波長側以外の素子の分光感度特性については、技術資料¹⁹⁾ から表 2 のとおりに設定した。ここで、 $T(R, \lambda)$, $T(G, \lambda)$ および $T(B, \lambda)$ を各色素子の波長 λ における相対感度とした。また図 7 に表 2 の特性を図示した。図 7 で、 $T(R, \lambda)$ については、項 4.2(2) で求めたパラメータを用いて描画した。

解析は非線形最小二乗法 (NLLSQ) によった。実測値 R/G と、G の計算値から、R の実測値による推定値を求め、これをガウス関数の標準偏差 (a) を含んだ理論式に当てはめた。

理論式は、直達日射の太陽光スペクトル¹⁶⁾、太陽高度、湖面入射のフレネルの反射透過係数²⁰⁾⁻²²⁾ を含んだ。理論式の分母は（相対感度）×（太陽光強度）の波長に関する積分であり、分子は（相対感度）×（水の光吸収による光減衰比）×（太陽光強度）の

波長に関する積分にフレネルの反射透過係数を乗じたものであった。それらの商をパラメータ a により偏微分して偏導関数を導出し、NLLSQ 計算を Microsoft Excel VBA マクロで行った。

なお、緑色光強度および青色光強度については、表 2 に示した相対分光感度特性から、上述の理論式の方法と同様に計算値を得た。また、B の実測値からの推定値は、R の場合と同様に、実測値の B/G に G の計算値を乗じて求めた。

また、波長 730 nm より長波長は、文献¹⁶⁾ に水の吸光係数の記載がないので、方法 2.1(2) により、超純水を分光光度計で測定した結果を用いた。

表 2 3 色カラーセンサーの相対分光感度特性の設定（ a はガウス関数の標準偏差）

(a) 赤 $T(R, \lambda)$	
ピーク	615 nm
短波長側	直線（傾き：0.0246 nm ⁻¹ ）
長波長側	ガウス関数（ a : NLLSQ により決定）
(b) 緑 $T(G, \lambda)$	
ピーク	540 nm
短波長側	ガウス関数（ $a=28.0$ nm）
長波長側	直線（傾き-0.0167 nm ⁻¹ ）
(c) 青 $T(B, \lambda)$	
ピーク	465 nm
短波長側	直線（傾き 0.0118 nm ⁻¹ ）
長波長側	直線（傾き-0.0133 nm ⁻¹ ）

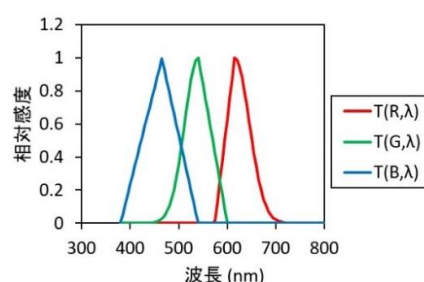


図 7 3 色カラーセンサーの相対分光感度特性設定値

(2) 解析・計算結果とその評価

今、NLLSQ 法で求めた標準偏差が技術資料値よりも大きい場合を想定すると、水の吸光係数を固定して計算しているため、水の光吸収以外の赤色光減衰の要素の存在が求められるという解釈となる。もしそうではなく、求めた標準偏差が技術資料値と同程度以下であれば、水の光吸収により 3 色カラーセンサー法の測定結果が説明されると考えられる。

NLLSQ 法による解析結果として標準偏差 $a = 30.6$ nm (技術資料値¹⁹⁾ 40.7 nm) を得た。図 8 に実測値の R/G、B/G と、標準偏差 a による R/G の NLLSQ 計算値および B/G の計算値を示した。

今回の 3 色カラーセンサー法の測定結果の解析では、求めた標準偏差 a が技術資料値の 25% 減であり、この方法による測定結果は水の光吸収で説明できると判断した。

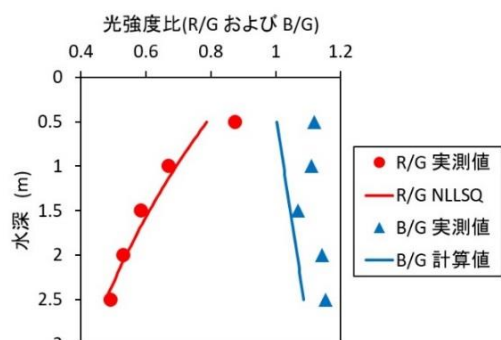


図 8 R/G、B/G の実測値などと水深との関係

(3) 赤色光減衰データ解析結果の統計的考察

3 色カラーセンサー法により得られた赤色光強度の実測値からの推定値と、その NLLSQ 法による計算値について、有意差を検討した。図 9 に赤色光強度とそれぞれの計算値を示し、青色光について併記した。

赤色光強度について、危険率 5% で、原点通過の直線 $y = bx$ (x : 計算値、 y : 実測値からの推定値) による回帰統計を行い、95% 信頼区間を求めたところ、 $0.92 \leq b \leq 1.10$ であった。この範囲に 1 が含まれたので、実測値からの推定値と計算値の間に有意差はないと判断した。したがって、NLLSQ 法によるパラメータ a の決定は統計的に妥当と判断した。

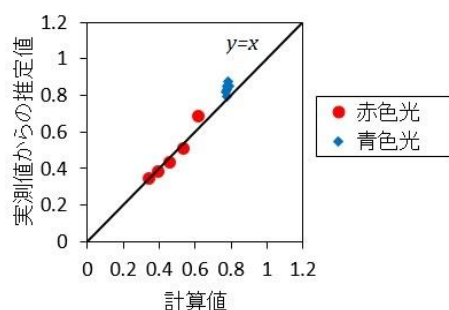


図 9 赤色光および青色光強度の計算値と実測値からの推定値との関係

(4) 光路長を外挿した場合の呈色の試算

図 10 に、測定日時条件下の赤色光強度および青

色光強度の実測値からの推定値をプロットし、赤色光強度については表 2 および NLLSQ 法で得たパラメータ a による計算値を、緑および青色光強度については表 2 のパラメータによる計算値を、それぞれ光路長 20 m まで外挿した結果を示した。光路長が長くなるほど赤色光 R が減衰し、光路長 18 m では、青色光 B が残り、緑色光 G は B の半分程度の強度となった。この試算結果は、項 4.1 の考察を支持するものであった。

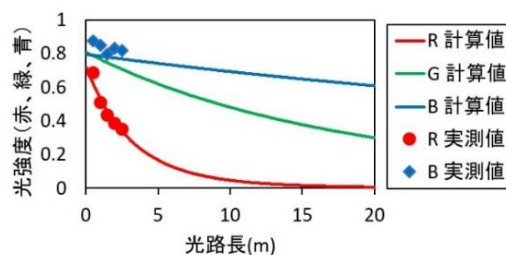


図 10 3 色カラーセンサー法による実測値からの推定値および計算値の光強度と光路長との関係

5. 結語

青池の青色呈色機構について、光測定とその結果の解析を行ったところ、次の結果を得た。

- 1) 光吸収スペクトルを、青池実地とその湖水の室内測定によって得た。
- 2) 青池実地のスペクトルと室内測定の青池湖水のスペクトルが一致し、さらにこれらが超純水のスペクトルと一致したことから、実験室で測定できない青池湖水の光挙動や、青池の地形、太陽光スペクトルなどの影響は否定された。
- 3) 水の光吸収スペクトルにより呈色を試算したところ、透過光の青色色調を示すことができた。光路長 18 m (青池の最大水深の 2 倍) では、赤色が消失し、青色光およびその半分の強さで緑色が残った。
- 4) 3 色カラーセンサー法による測定では、実測値としての赤色光強度が、水深が深くなるにつれて減衰する現象が観測された。これにより透過光として青色と緑色が残ると推定された。
- 5) 上記の水深別測定結果について、1) の水の光吸収スペクトルにより解析したところ、その結果を説明できた。光路長 18 m の透過光では、赤色光は消失し、緑色光強度が青色光強度の約半分の強度となると計算された。

以上のとおり、青池実地とその湖水等の光測定結果により、水による赤色光吸収が青池湖内における主要な光減衰の要因と推定された。これは 2016 年度

に提唱した仮説⁴⁾を支持する結果である。

湖面への太陽光の入射・透過・湖底での反射・透過を経る過程の透過段階で赤色光が吸収され、残った青色光と、その半分の強さの緑色光が湖面から射出して観測者に届き、青色呈色を示すと推定された。

謝辞

本研究を進めるに当たり、国立研究開発法人 国立環境研究所 田中 敦 氏より、貴重な御指導をいただきました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) 高松信樹, 他: 津軽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, **73**, 284-284, 2008.
- 2) 高貝慶隆, 他: 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. 磐梯朝日自然環境保全研究所 福島大学共生システム理工学類 2014 年度報告書, 155-162, 2014.
- 3) 高貝慶隆, 塘 忠顕 編: 裏磐梯五色沼湖沼群の青色色彩とナノコロイド粒子との関わり. 裏磐梯・猪苗代地域の環境学, 福島民報社, 福島, 2016.
- 4) 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年報, **27**, 36-52, 2016.
- 5) 高貝慶隆, 他: 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. 共生のシステム: 磐梯朝日遷移プロジェクト, **14**, 80-87.
- 6) 福島大学: 五色沼湖沼群案内.
<http://www.sss.fukushima-u.ac.jp/bandai-asahi-project/12100501.html>
(Accessed 11 Feb 2018)
- 7) 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.

- 8) 酒井軍治郎, 他: 十二湖周辺の利水調査報告書. 青森県企画部, 青森, 1962.
- 9) 青森県史編さん自然部会編: 青森県史自然編 地学. 青森県, 青森, 2001.
- 10) 青森県地学教育研究会編著: 青森の自然をたずねて 新訂版 日曜の地学-2. 築地書館, 東京, 2003.
- 11) 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.
- 12) 鈴木哲哉: ボクの Arduino 工作ノート. ラトルズ, 東京, 2013.
- 13) 赤坂 裕, 木村健一 編: 気象データとその利用 建築環境学 1, 丸善, 東京, 1992.
- 14) 田中丸治哉, 他: 地域環境水文学 シリーズ地域環境工学. 朝倉書店, 東京, 2016.
- 15) Pope, R. M. et al.: Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, **36**, 8710-8723, 1997.
- 16) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第四報): 青色呈色のシミュレーション, 投稿準備中.
- 17) 日本工業規格 JIS Z8701 色の表示方法—XYZ 表色系及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 表色系.
- 18) 日本工業規格 JIS X9204 高精細カラーディジタル標準画像(XYZ/SCID).
- 19) 浜松ホトニクス: S9706 技術資料. 浜松ホトニクス, 東京, 2008.
- 20) 鶴田匡夫: 応用光学 I 応用物理工学選書 1. 培風館, 東京, 1990.
- 21) 山口一郎: 応用光学 応用物理学シリーズ. 応用物理学会編, オーム社, 東京, 1998.
- 22) 谷田貝豊彦: 光学. 朝倉書店, 東京, 2017.

Coloration mechanism of Aoike Pond in Lake Juniko (3rd report): analyses of photometric results

Ryuji Hanaishi, Naoto Osaka, Megumi Shibata, Naofumi Nozawa, Hirohisa Sato

This is a follow-up report on the mechanism of blue coloration of Aoike Pond in Lake Juniko that describes the analysis results of photometry. For pond water samples measured inside Aoike Pond and after brought back to the laboratory and ultrapure water, the visible absorption spectra were almost identical to each other in terms of their structures and intensities, and the absorption coefficients were higher in the red-light region. By utilizing the water absorption coefficient, we successfully reproduced the blue color in the transmitted light. Furthermore, a three-color sensor was launched to Aoike Pond with the depths up to 2.5 m to measure the relative red-light intensity, which was found to decrease with increased depth of the sensor. This result was interpreted on the basis of the water absorption coefficient, indicating that the red light almost disappeared in the optical path length of 10-20 m using available spectral sensitivity parameters of the red light sensor element and that the transmitted light turned to blue light and green light with approximately half the intensity of the blue one. These results suggest that assuming that the light is reflected from the bottom of Aoike Pond, the light observed after entry into the pond surface, downward transmission, reflection, upward transmission, and emission through the surface may exhibit a blue color, and support the hypothesis that the blue coloration is caused by red-light absorption in pond water itself.

Key words: Aoike Pond, Lake Juniko, Coloration with blue color, Absorption spectrum