

資料(Data)

白水湖(大白川ダム, 岐阜県大野郡白川村)の湖水がエメラルドグリーンに見える要因の解析事例

——湖の水色を科学教材として活用するために——

A preliminary study of the coloration factor in emerald green lake water of a reservoir, Hokusui-ko, Shirakawa, Gifu, Japan: In order to make use of the water color of lake as the teaching material of science

塚本 真弓*

TSUKAMOTO, Mayumi*

野崎 健太郎**

NOZAKI, Kentaro**

キーワード: 湖, 水色, 硫酸イオン (SO_4^{2-}), 科学教材

Key words: lake, water color, sulfate ion (SO_4^{2-}), teaching material of science

1. 研究の背景と目的

透明度が高く水深が深い湖の湖面は, 晴れた日には, 遠目からは青く見える。この仕組みは, 湖に入射した光の内, 可視光線の青色を示す波長が最も深い水深まで届くため, 人の目には, 水に吸収されずに残った青色が反映されると説明できる (ホーン・ゴールドマン, 1999; Wetzel, 2001)。つまり青く見えるのは, 青色以外の光が, 水や水に含まれる物質により吸収・消失した深い部分のみであり, 湖岸で汲んだ水は透明になる。一方で, 湖に緑や赤色の光合成色素を持った植物性プランクトンが繁殖していれば湖面は緑や赤褐色に見える (図1)。これら水の色の違いとその理由は, 子どもたちに自然への関心を引き起こし, 色の実体について考えさせる良い教材になるだろう。そのためには, 高度に専門的な研究論文に加え (Kishino *et al.*, 1984; 岸

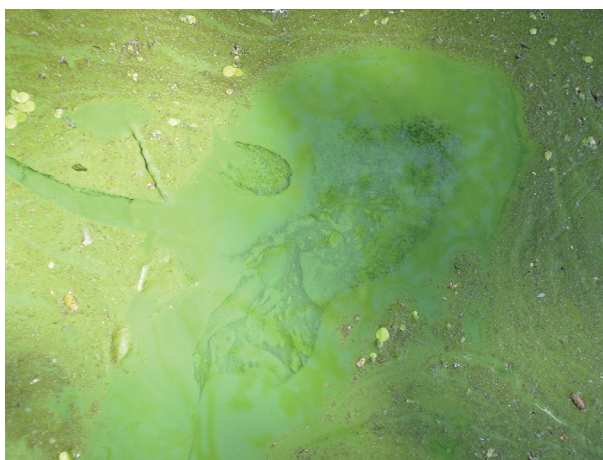


図1. 植物性プランクトンが大増殖したため池の水面

(2005年10月14日, 愛知県日進市)

* アイシン・エーアイ(株)

** 椋山女学園大学教育学部 (E-mail: ken@sugiyama-u.ac.jp)

野，1996），小学校から高等学校の理科室で実験可能な手法（日本陸水学会東海支部会編集，2014）を用いた調査事例の蓄積が必要である。そこで本研究では，岐阜県飛騨地方に設置された3つの人造湖の湖水を，基礎的な手法で化学分析し，色の違いとの関連を考察した。本論文での役割分担は，塚本が現地調査，水質分析の一部および論文執筆，野崎が化学分析の一部と論文執筆，である。

2. 方 法

2-1. 調査地および現地調査の項目

現地調査は，2008年9月に，1泊2日で実施した。初日に白水湖（岐阜県白川村，大白川ダム，庄川水系の大白川），2日目に御母衣湖（岐阜県白川村，御母衣ダム，庄川）と岩屋ダム（岐阜県下呂市，木曽川・飛騨川水系の馬瀬川）で行った（図2）。白水湖と御母衣湖は隣接し，庄川は日本海へ注ぎ，岩屋ダムは太平洋に注ぐ木曽川水系に属する。現地では，各ダム湖の流出口付近と上流域の2ヶ所の表面水で水質の測定を行った。水温はアルコール棒温度計，電気伝導度は伝導度計（東亜 DDK，CM-21P），pH はパックテスト（共立理化，WAK-pH）で測定した。水質分析用の試水は，ポリタンク（5L）に採取した。



図2. 調査地である白水湖，御母衣湖および岩屋ダムの位置

2-2. 実験室での化学分析

試水は色度と濁度（日本電色，WA1）を計測した後，ガラス繊維ろ紙（東洋ろ紙 GF-75）を用いてろ過した。ろ紙に捕集された懸濁物質はクロロフィル *a* 量の分析に用いた。植物性プランクトン量の指標となるクロロフィル *a* 量は，ガラス繊維ろ紙から90%アセトンで抽出し，SCOR/UNESCOの方法（日本陸水学会東海支部会編集，2014）で算出した。ろ過した試水は，アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ），亜硝酸態窒素（ $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ），硝酸態窒素（ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ），リン酸態リン（ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ），硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）の分析に用いた。窒素・リンは，日本陸水学会東海支部会編集（2014）に掲載された方法，硫酸イオンは，硫酸バリウムによる白濁を利用する比濁法で行った（日本分析化学会北海道支部編，1994）。

3. 結 果

3-1. 湖水の色

各調査地の写真を図3a～cに示した。白水湖はエメラルドグリーンで，青や白が混ざった色の様にも観察できた（図3a）。特に流出部分では白色が強く，少々白濁して見えた。現地の方に聞き取り調査をしたところ，白水湖の水源となる大白水谷と小白水谷から流入してくる水量が増えると，湖水の青色が強くなる。との情報も得た。御母衣湖はやや黒ずんだ青緑色であった（図3b）。岩屋ダムは青みが強い青緑色であった（図3c）。青緑色に白色が混じったエメラルドグリーンは白水湖のみで見られた。

3-2. 水温，pH，電気伝導度，濁度および色度

各調査地の測定結果を表1に示した。3地点の中で，白水湖は，湖水が $\text{pH}<7$ の弱酸性で電気伝導度が高いという特徴を示した。特に電気伝導度は，御母衣と岩屋が4 mS/mであるのに対し4倍の16 mS/mを示し，溶存態無機イオンが多く含まれている水質であることが明らかになった。白水湖の湖畔には温泉もあることから，湖水の酸性と高い電気伝導度は，その影響と考えられる。

3-3. クロロフィル *a*，溶存態窒素，リン酸態リンおよび硫酸イオン

各調査地の分析結果を表2に示した。クロロフィル *a* は $0.4\sim 4.0\ \mu\text{g/L}$ で特に高い地点は見られなかった。なお，クロロフィル *a* を90%アセトン溶液で抽出中に白水湖の試料にのみ，緑色の色素の析出が見られた（図4）。しかしながら，クロロフィル *a* の結果には反映されていないため，この着色は生物学的な要因では無い。

アンモニア態，亜硝酸態，硝酸態窒素で構成される溶存態窒素は，白水や御母衣に比べ，岩屋で3～6倍の高い値を示した。リン酸態リンは，どの地点も大変に低い値であった。硫酸イオンは，白水で御母衣や岩屋より10倍の高い値を示した。硫酸イオンは主要な溶存無機イオンであるため（日本分析化学会北海道支部編，1994），白

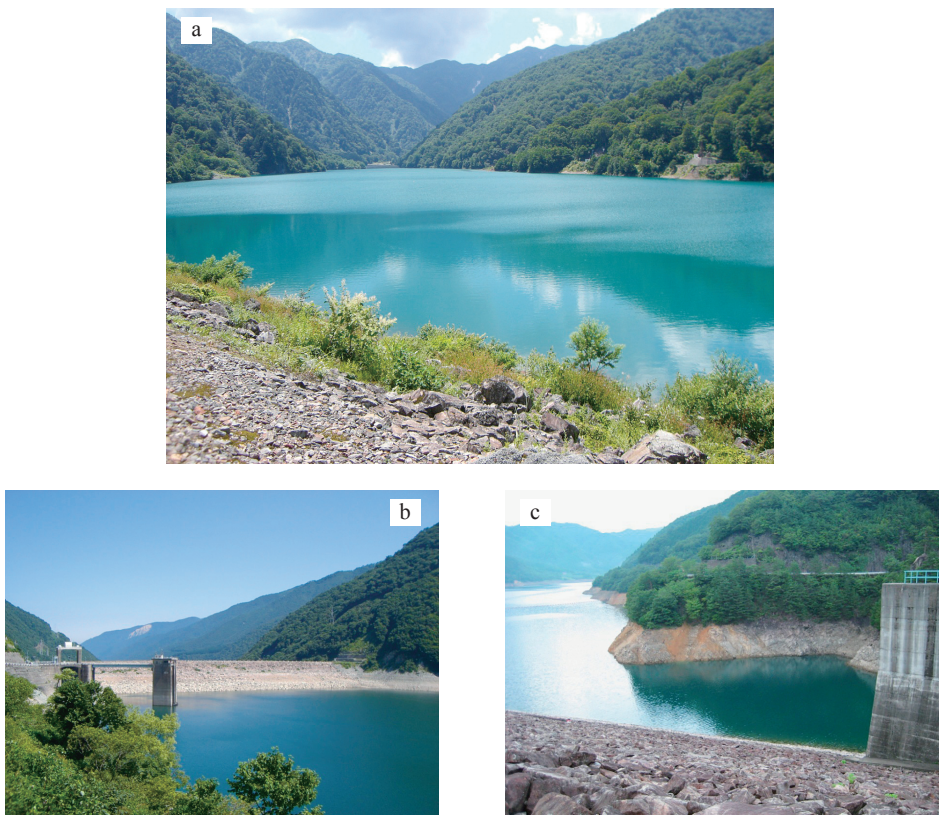


図3. 白水湖（a）、御母衣湖（b）、岩屋ダム（c）

表1. 各調査地における調査時刻、湖水表面の水温、pH、電気伝導度、濁度および色度

調査地	採水地点	時刻	水温 (°C)	pH	電気伝導度 (mS/m)	濁度 (度)	色度 (度)
白水	上流	11:58	22	6.6	15.9	1.8	1.1
	流出	12:30	23	6.6	16.0	0.0	1.9
御母衣	上流	9:06	26	7.3	4.3	1.9	3.6
	流出	10:30	26	7.2	4.4	0.7	2.5
岩屋	上流	18:38	22	7.2	4.5	0.1	1.0
	流出	18:00	27	7.2	4.0	1.2	0.7

表2. 各調査地におけるクロロフィル a、溶存態窒素、リン酸態リンおよび硫酸イオン濃度

調査地	採水地点	クロロフィル a (μgChl.a/L)	NH ₄ ⁺ -N (μgN/L)	NO ₂ ⁻ -N (μgN/L)	NO ₃ ⁻ -N (μgN/L)	PO ₄ ³⁻ -P (μgP/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
白水	上流	1.5	12.2	3.2	65.1	0.8	30.0
	流出	2.0	11.1	6.1	58.9	0.8	31.6
御母衣	上流	4.0	15.6	1.4	38.4	未検出	2.5
	流出	0.4	12.2	0.1	65.1	未検出	2.5
岩屋	上流	0.4	10.0	未検出	267.4	1.7	3.0
	流出	1.8	15.6	1.1	114.6	0.8	3.0



図4. 白水湖のクロロフィル *a* 抽出中に観察された緑色の着色
(2008年11月20日分析)

水湖で電気伝導度が高いこと（表1参照）と矛盾しない。

4. 考 察

水中に入射した光は、粒子（主に植物性プランクトンや有機物の破片）、溶存有機物、そして水自体に吸収されて減衰する（Kishino *et al.*, 1984）。その結果が湖面の色となる。ここでは、本研究で得られた調査結果から白水湖のエメラルドグリーンな着色要因について議論する。まず、湖水中の生物以外の粒子、例えば微細な土砂による着色の可能性を考える。表1から、白水湖の濁度は極めて低いことが読み取れる。特に流出水は濁度が0となっており、粒子による着色の可能性は否定される。そして、生物粒子である植物性プランクトンによる着色もクロロフィル *a* の値の低さから否定される。植物性プランクトンの栄養分となる溶存態窒素やリンも低く、白水湖では着色するような大増殖は生じないと考えられる。例えば、諏訪湖は1997～2001年に植物プランクトンによる着色が観察され、その時のクロロフィル *a* は50～120 $\mu\text{g/L}$ を示していた（花里ほか, 2003）。この結果と比べると、白水湖のクロロフィル *a* は極めて少ないと言える。

次に、溶存有機物による着色の可能性を考えてみる。植物の枯死体から生成するフミン酸は湖水の着色の原因となる（Carpenter *et al.*, 1998；Marlager and Vincent, 2000；Nozaki *et al.*, 2009；日本陸学会東海支部会編集, 2014）。表1から、白水湖の色度は極めて低い。よって、溶存有機物による着色の可能性は否定される。そこで、化学的な物質による着色の可能性を考えた。表2から、白水湖の硫酸イオンの値は、他の湖と比べて著しく高い数値を示していた。硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）は、イオウコロイドと酸素が結合したものであり、イオウコロイドが高濃度に含まれる湖水は白濁し、青色を呈することが報告されている（恩田ほか, 2003；Ohsawa *et al.*, 2010）。さらに、

白水湖のエメラルドグリーンは，硫酸イオンと 2 価の鉄イオン (Fe^{2+}) から構成される硫酸鉄 II (FeSO_4) の結晶の色に酷似していた。そこで，筆者らは，白水湖の湖水には，硫酸イオンに加え 2 価の鉄イオンが大量に存在し，エメラルドグリーンの色を生じる原因になっていると推測した。実際に，阿蘇山中岳の湯だまり，草津白根山の湯釜の湖水がエメラルドグリーンとなる仕組みは，青色と乳白色に関与するイオウコロイドに加え，溶存する 2 価の鉄イオンによる太陽光線の吸収にあることが解明されている（恩田ほか，2003；Ohsawa *et al.*, 2010）。

本研究では，各種化学成分を定量するために分光光度計を用いたが，クロロフィル *a*，硫酸イオンといった指標は，濃度の違いを目視観察することが十分に，可能である。安価な吸光光度計でも測定は可能である。そして，実験自体は参考書を手に置けば，小学校の理科室でも実施できる。湖水の色は，その要因を，生物以外の粒子，生物粒子（プランクトン），溶存有機物および溶存の無機化学成分に分けて段階的に解析を行えば，興味深い科学教材になると思われる。

謝 辞

本研究のとりまとめにあたり、科学研究費補助金基盤研究 C（研究課題番号：24501114，研究代表者：野崎健太郎）を用いた。

■引用文献

- アレキサンダー J ホーン・チャールズ R ゴールドマン（1999）陸水学，p. 45–49，手塚泰彦（訳），京都大学学術出版会。
- Carpenter, S. R., Cole, J. J., Kitchell, J. F. and Pace, M. L. (1998) Impact of dissolved organic carbon, phosphorus and grazing on phytoplankton biomass and production in experimental lakes. *Limnology and Oceanography*, **43** : 73–80.
- 花里孝幸・小河原誠・宮原裕一（2003）諏訪湖定期調査（1997～2001）の結果。信州大学山地水環境教育研究センター研究報告，**1** : 109.
- Kishino, M., Booth, C. R. and Okami, N. (1984) Underwater radiant energy absorbed by phytoplankton, detritus, dissolved organic matter, and pure water. *Limnology and Oceanography*, **29** : 340–349.
- 岸野元彰（1996）光利用と光合成。月刊海洋（号外），**10** : 40–49.
- Marlager, S. and Vincent, W. F. (2000) Spectral light attenuation and the absorption of UV and blue light in natural waters. *Limnology and Oceanography*, **36** : 642–650.
- 日本分析化学会北海道支部編（1994）水の分析（第 4 版），化学同人。
- 日本陸水学会東海支部会編集（2014）身近な水の環境科学（実習・測定編），朝倉書店。
- Nozaki, K., Kohmatsu, Y., Yamamoto, T. and Tuji, A. (2009) Phytoplankton productivity in a pond of brownish-colored water in a Japanese lowland marsh, Naka-ikemi. *Limnology*, **10**, 177–184.
- Ohsawa, S., Saito, T., Yoshikawa, S., Mawatari, H., Yamada, M., Amita, K., Takamatsu, N., Sudo, Y. and Kagiya, T. (2010) Color change of lake water at the active crater lake of Aso volcano, Yudamari, Japan: Is it in response to change in water quality induced by volcanic activity? *Limnology*, **11** : 207–215.
- 恩田裕二・大沢信二・高松信樹（2003）活動的強酸性火口湖の呈色因子に関する色彩学的・地球科学的研究。陸水学雑誌，**64** : 1–10.
- Wetzel, R. G. (2001) *Limnology*, 3rd edition, p. 64–65, Academic Press.