

陸水物理学会誌

Journal of the Japanese Society of Physical Hydrology

第 6 卷 第 1 号

2024 年 12 月



陸水物理学会

The Japanese Society of Physical Hydrology

陸水物理学会誌

第6巻 第1号 2024年12月

目次

巻頭言	池田 隆司 ...	1
論文		
RAWファイルの画像解析に基づく青森県・青池の呈色機構	花石 竜治, 知北 和久 ...	3
会務報告		29
投稿規程		31
執筆要領		33
査読規程		37
編集後記		41

表紙画の説明：

2024年度陸水物理学会長崎大会（第45回）における巡検において、
雲仙地獄を撮影（2024年12月8日）。編集委員である藤井智康会員撮影。

巻頭言 (Foreword)

陸水物理的アプローチ

池田隆司¹

水資源と水環境、気候変動と地球温暖化、地震や火山などの災害、自然エネルギー問題等々、地球の陸水を取り巻く課題は極めて広く多様である。多くの水関連学会が存在することでも分かる。本誌前号 (Vol. 5: 1) の巻頭言で、由佐悠紀先生が陸水物理研究会発足のいきさつを紹介されている。日本陸水学会の中でも物理系を中心とした研究組織の充実ということが意識されていた。発足当時、筆者は北海道大学地球物理学科陸水学講座の大学院生であったが、中尾欣四郎先生を囲んで研究会の特性や在り方について夜な夜な議論していたことを覚えている。当会の大きな意義の一つは、発表会で十分な時間を取って徹底的に議論できることにある。世代交代が進み学生の数も減って大部様変わりしてきたが、学生と共に学び育てるといふ本来の目的を見失ってはならない。

陸水に関連する諸課題への研究方法や手段はそれぞれの分野、研究者で異なり自由であって然るべきだが、物理的なアプローチも不可欠である。地殻内の水と熱が研究テーマとすると地下水や温泉は直接的な研究対象ではあるが、そのみならず火山や地震に関連する諸課題に関しても水の存在は無視できない。その時に一つの問題解決の糸口としてきたのが図1で、“流体の存在と役割”を示している。三角錐の各頂点には水、熱、力の物理的要素、および化学的要素が灑かれそれぞれの相互作用の下で地殻内でのプロセスが進行しているということがうまく説明されている。例えば、地震発生と水との関係を考えるとき「水」と「力」の相互作用が強く関わっている。地殻に外力 (stress) が加わると地下深部の岩盤中にせん断型の脆性破壊が起こり地震となる。すなわち、せん断応力が岩石の粘着力と摩擦力の和に達した時に破壊に至る。

破壊面に間隙流体圧が存在する場合には、有効応力 (= 法線応力 - 間隙流体圧) が減少し破壊が促進されることになる。逆に間隙流体圧が下降すると地震発生が抑制される。また、岩石の中の水を含む空隙が力によって変形して透水性が変化する。

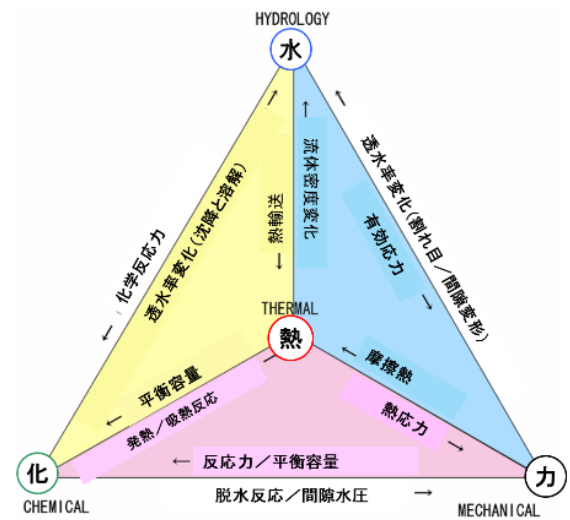


図1 地殻内の流体の存在と役割 (Workshop on Continental Scientific Drilling (1988) からの図を改変)

2024年1月1日、能登半島地震 (M=7.6) が発生した。これに伴い津波、土砂災害、液状化などの被害が発生し死者 244 名 (2月29日時点) にも及んでいる。くしくも 2014年12月に第36回陸水物理研究会が能登町の金沢大学臨海実験施設で開催された。能登半島を巡る巡検では輪島の朝市や千枚田も訪れた。テレビなどの報道で地震後の現地の惨状を見てその様変わりに胸が打たれる。この地震の発生にも深部から上昇してきた流体が関わっているとも言われている。能登半島が一日でも早く復興されることを祈るとともに、陸水物理的アプローチが災害の予測や復興対策に役立つことを願ってやまない。

最後に、当会は 2023 年度新潟大会が第 44 回で長い歴史が刻まれてきた。筆者は由佐先生の後を引き継いで 2004 年から 2011 年までの 8 年間事務局長を務めさせていただいた。なんとか継続して今日に至っているのは先達のご指導のみならず学生諸君に大いに助けられたからである。ここに、改めて感謝申し上げる。

¹ 元運営委員長，北海道大学名誉教授
https://doi.org/10.34502/physhydro.6.1_1

原著論文 (Research Article)

RAW ファイルの画像解析に基づく青森県・青池の呈色機構

花石竜治¹・知北和久²**Coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture,
based on image analyses of RAW files**Ryuji HANAISHI¹ and Kazuhisa A. CHIKITA²

摘要 従来の青森県・青池の呈色機構研究で課題であった、画像の生データである RAW ファイルの解析を行い、JPEG ファイルを用いた結果と比較した。画像解析では、著者らの前報の湖面上の放射輝度分布の式を改良し、直散分離により水平面全天照度から法線面直達照度を求め、晴天時の日射と考えた。また、デジタルカメラの感度およびホワイトバランス係数をカラーチャートを用いて再決定した。以上を踏まえて画像解析を行った結果、前述の放射輝度分布の式のモデルパラメータで青池の呈色を良好に再現できることがわかった。その青色呈色には湖底乱反射が寄与しており、水の分子散乱を伴うと推定された。この青色は水の光学的性質に帰せられるものである。

キーワード 青池, RAW ファイル, 湖底乱反射, 分子散乱, 直散分離

Abstract It has been a problem in the study of the coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture to analyze the raw image data, RAW files, and compare the results with those obtained using JPEG files. In the present analyses, the authors refined the formulas for the distributions of radiances on the pond surface proposed in their previous report, and then obtained normal direct solar illuminances from horizontal global illuminances acquired by the separation of solar radiation into direct and diffuse components. The direct solar illuminances were then judged to correspond to solar radiations giving colorations of Ao-ike Pond on a sunny day. In addition, the sensitivity and white balance factors of the digital camera used were re-determined utilizing a color chart. Image analyses performed by the above methods demonstrated that the model parameters in the aforementioned formulas for the distributions of radiances can fairly well duplicate the blue coloration of Ao-ike Pond. It was clearly shown that the blue coloration is due to irregular reflection at the pond bottom in addition to molecular scattering by water. This blue coloration is attributed to the optical properties of water itself.

Keywords Ao-ike Pond, RAW file, Irregular reflection at bottom, Molecular scattering, Direct/diffuse separation

1. はじめに

現代はリモートセンシングにより、地表の衛星画像から海域や陸水の水質はもとより生態系についての情報が得られる時代である[1,2]。

水体(Water body)の呈色は水質の化学を反映する。炭素・炭素二重結合や芳香環を持つある種の有機物が溶存している場合、紫外領域末端から吸収帯の裾が可視領域に広がり、紫色の光を吸収するため、黄色を呈する。クロロフィルは、赤色光と青色光を吸収し、緑色を呈する。懸濁物質は、光を散乱させ、呈色を暗化さ

せる。

水面の上から見える水面の呈色は、各波長における水面からの光の強度を表す分光反射率により求められる。これを光の吸収や散乱などの光学的なパラメータ(光学的固有特性, *Inherent optical properties*)から計算する基本理論が「放射伝達理論」であり、この理論においては、光の放射輝度に対する積分微分方程式で光の挙動が記述される[3]。これまで、この理論に基づいた呈色研究が数多くなされてきた[3]。

また、近年では、コンピュータ技術の発達により、水体の呈色は衛星からスマートフォンに至るまでの多

*1 青森県東青地域県民局環境管理部 〒030-8566 青森市東造道1-1-1 Tosei Regional Administration Bureau, Aomori, 030-8566

*2 北海道大学北極域研究センター 〒001-0021 札幌市北区北21条西11丁目 Arctic Research Center, Hokkaido University, Sapporo, 001-0021

https://doi.org/10.34502/physhydro.6.1_3

種の機材で観測されている。過去 15 年間に、スマートフォンやデジタルカメラで水面を撮影し、その画像から水質についての情報を得る試みもなされてきた[4-6]。水体の呈色を理論的に再現し、それによって水質を推定することは、現代における挑戦的な課題の一つといえる。

他方、水体が上記のような着色溶存物質や懸濁物質をほとんど含まない場合、その呈色は青色となる。これは、水そのものが赤色光を吸収し、また、青色光を強調して散乱する性質がある[3]ため、定性的には 1970 年代から認識されてきた[7]。この水そのものの青色（水の青）は、水体の最も基本的な呈色である。

水の青の原因の一つである赤色光吸収は、赤外分光法の分野では、水分子内の共有結合の倍音振動と帰属される吸収帯が赤外領域から可視領域長波長側にシフトしているためと解釈され、振動状態の遷移によるものであり、一般的に紫外可視領域に現れる電子状態の遷移によるものではない[8]。一方、重水は、水に比べて振動のエネルギー状態が異なるため可視領域へシフトした振動吸収帯は吸収強度が極めて弱く、青色呈色しない[8]。

水の青のもう一つの原因は、水分子が青色光を強調して散乱する分子散乱である[3]。分子散乱の見方からは、Rayleigh の理論により、光の波長より小さい分子が波長の 4 乗分の 1 に比例する強度で光を散乱することが導かれる[9]。これは分子を量子力学的に扱った場合に得られる結論でもある[10]。一方、Einstein-Smoluchowski の揺らぎの理論においては、水の光散乱の体積散乱関数が凝集相の揺動から導出される[9]。この見地からすれば、水の分子散乱は密度変動散乱 (Density fluctuation scattering) と表現すべきであるが、本稿では慣習に従い分子散乱と呼ぶことにする。

さて前述のように、水体の呈色から水質を推定する研究は数多くなされてきたが、一方、水の青そのものを、水の光学的固有特性である吸収と散乱のパラメータから理論計算した試みは少ないと思われる。これは、水の青だけが問題となる水体の例が少ないことも一因であろう。このような中で、佐藤[11,12]は湖水が仮想的に光学的に純水であり、その吸収と多重散乱だけが考えられる場合の理論的なセッキ板透明度を試算した。

現在のところ、水体の分光反射率を理論的に計算するソフトウェアは大きく分けて二つあり、一つは、平行平面層仮定 (Plane parallel assumption) を用いる HydroLight [13] であり、もう一つは、水体を 3 次元格子に分割して放射輝度の伝達を計算する PlanarRad [14] である。前者は、水体の 3 次元構造を鉛直方向の水深のみの 1 次元問題に簡略化している。後者は、3 次元問題を直接的に解くが、それぞれの 3 次元格子から隣接

する格子への放射輝度の伝達をすべて考慮することから、多くのコンピュータ資源を必要とする。

このような中で、著者らは青色湖沼として知られる青森県・青池 (Fig. 1) の呈色機構について研究を行ってきた[15-20]。青池は山間小湖であり、最大水深が湖面半径の約半分、回転放物面と近似できる湖盆を持つ[21]。また、流出入河川がなく、湖底からの湧水のみで涵養され[22]、透明度が全透である[23]。このように、青池の呈色は前述の水そのものの青の発現である可能性が高く、懸濁物質の存在や複雑な湖盆形状といった要因の影響が無視できる状態で考察できると考えられ、青池は光物理の見地から呈色計算のモデル系として魅力的かつ挑戦的な対象である。

青池の呈色計算を行う場合、湖盆形態を考慮する必要があり、水深のみの 1 次元問題に簡略化した HydroLight は適用できない。また、これまで著者らは観測点から観測する光強度のモデル式が呈色を再現するようにそのパラメータを求め、これにより呈色要因を推定するという方針を取ってきた。このため、PlanarRad よりも高速な呈色計算法の開発が不可欠であった。

そこで、著者らは高速な計算法である光線逆方向追跡法 (Reverse ray tracing method) が水体の呈色計算に応用できることに着目した[17-20]。これに基づき、前報[20]までに、湖底乱反射、湖内の水分子散乱および懸濁物質のミー散乱に起因する観測光の放射輝度の湖面上の分布を表す一連のモデル式を導出した。この式によって、湖底乱反射点あるいは湖内散乱点に対応する湖面上の離散的な光射出点での放射輝度から、湖面上の放射輝度分布が得られた。著者らは、これらの式を用いて青池画像を解析し、青池の青色呈色の主要な機構は水そのものによる分子散乱であると判断した[20]。

一方、これまでの解析では、デジタルカメラが出力した湖面画像の圧縮ファイルである JPEG ファイルをキャスト変換してビットマップ形式として使用してきた。このため、作為的な色の加工がない RAW ファイルを用いた直接的な画像解析が期待されていた。本研究では、RAW ファイルを使用してこの点を改善し、従来よりも正確な解析を試みる。

また、本研究では、RAW ファイルの活用と併行して、従来の湖面上の放射輝度分布の式および解析法にあった問題点を以下のように改善する。

まず、放射輝度分布の式は、それを与えるために離散的な湖面上の光射出点における放射輝度を用いているが、従来は、その誘導過程において、湖面から光が射出するとき、光の湖面への入射角の効果[24]を含めていなかった。本研究ではこの効果を含めて改善する。

次に、この放射輝度分布の式を誘導する際に必要な積分変数の置換の可能性について、著者らの前報[20]は、湖面からの光の射出直前までの考察に基づいており、湖面からの射出後に観測される光の放射輝度を考察するには不十分であったと考えられることから、本研究では、この置換可能性の証明を前報[20]とは異なったアプローチで行い、本稿の付録に記述する。

また、解析における照度の設定では、従来、晴天時の照度計の指示値を太陽高度補正した法線面照度を法線面直達照度と考えていた。一方、晴天時でも水平面全天日射量から法線面直達日射量と水平面天空日射量（天空日射量とは、散乱日射量と同じ）を求める、いわゆる直散分離の方法が存在し[25]、快晴時でも散乱日射量を除外した純然たる直達日射量を求めることができる。本研究の対象である青森県・青池のように周囲を崖に囲まれた場所では、晴天時に入射して呈色に関係する日射は、散乱日射の寄与が比較的少なく、法線面直達日射のみに近いできると考える。このことから、今回は直散分離による日射量の評価を行う。

さらに、モデルの汎用性を確認するために、従来の観測定点以外の観測点から撮影した画像も解析する。

以上のとおり、本研究では、青森県・青池の呈色機構の再検討を RAW ファイルの使用を基軸として進める。本稿では、RAW ファイルを使用した解析に併せて上記の問題点について検討した結果も報告する。

2. 調査対象地域

青森県・青池は北緯 $40^{\circ}33'38.04''$ 、東経 $139^{\circ}59'5.16''$ に位置し、青森・秋田両県に跨がる世界自然遺産・白神山地の山麓にある十二湖の一つで、青森県西津軽郡深浦町に属する。Fig.2 に青池とその関連湖沼の位置関係を示した。

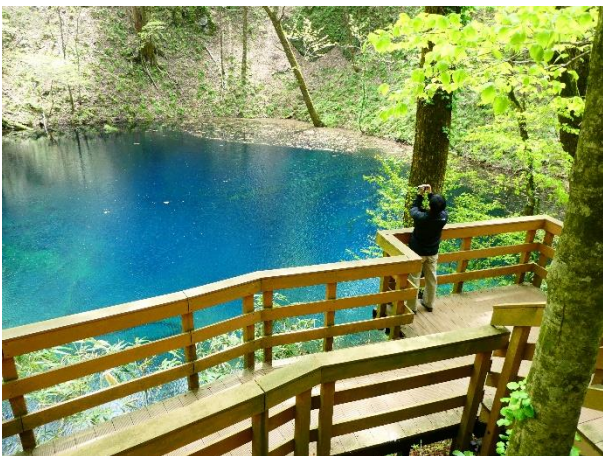


図1. 青池, 2023年4月29日 11:20 撮影.

Fig. 1. Ao-ike Pond, photographed at 1120h (JST), Apr 29, 2023.

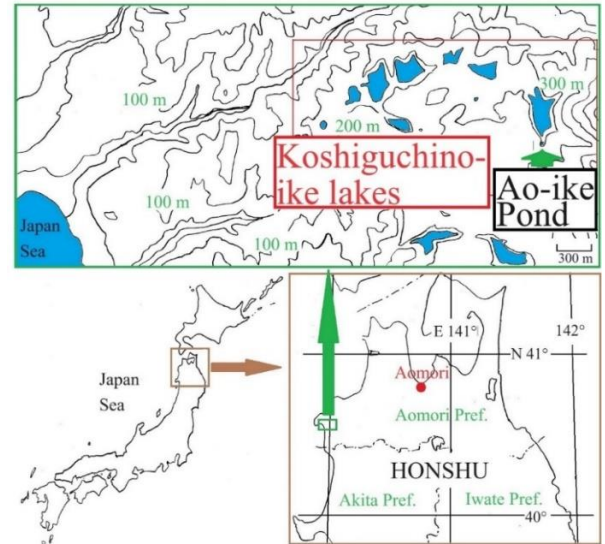


図2. (右下) 本州にある十二湖の位置. (上) 50 m 間隔の等高線図上での十二湖の青池, 越口ノ池湖群および関連湖沼の位置. 等高線図の数値は標高(m).

Fig. 2. Locations of Juni-ko Lakes in Honshu Island (right bottom) and Ao-ike Pond, Koshiguchino-ike lakes and other associated ponds of Juni-ko Lakes (top) on the topographic map (50 m interval). The elevation is shown in m above sea level.

青池は、湖岸長 125 m, 最大水深 8.8 m で全透と報告されている[21,23]。また、標高 240 m にあるその湖面は、十二湖の中の越口ノ池（こしぐちのいけ）湖群の最上位に位置する。青池は完全に閉鎖的で、流出入河川はなく、湖水は地下水源泉だけで供給されていると考えられている[22]。湖水の水温は年間を通して 10°C 前後であり、冬季に結氷せず[26]、湖水の滞留時間は 14 日と推定されている[20]。

青池湖水の水質の報告は数報存在する[15,26-28]。花石ほか[16]は、可視領域において、その湖水の吸光度に有意に寄与する懸濁物質あるいは溶存物質は、溶媒の水以外に存在しないことを示した。このため、可視領域において、その吸収スペクトルは純水と同じとみなせる。

3. 理論的背景

3.1. 呈色要因のモデリングと散乱の一次近似

(1) 呈色要因

著者らは、青池の呈色は波長に依存する水の光吸収と分子散乱によると考えて、可能な呈色要因として湖底乱反射、水の分子散乱および懸濁物質のミー散乱を仮定してきた[17-20]。本研究でもこの仮定を踏襲する。

ミー散乱は、その散乱係数は光の波長に依存しない（エネルギーに依存しない、すなわち白色的）と仮定

できるが、散乱光が水中の光の経路に沿って光吸収を受けるため呈色を与える。また、湖底の乱反射光も水中を進むときに光吸収を受けるため、湖底のアルベド(反射率)が有色的(波長に依存する)か白色的であるかに関係なく、呈色を与える。

一方、水分子による散乱光は、上記二つの光現象と同様に湖内において光吸収を受けるが、さらに散乱光が波長の4乗分の1に比例する強度を持つ[7,9]ことから、青色光が相対的に強く散乱される。このため、水の分子散乱は、水の光吸収と光散乱の両方の効果で湖面を濃い青色に呈色させる。

本研究では、以上のとおり、青池の青色呈色は湖底乱反射における有色的なアルベド以外は、水の光学的性質によると仮定する。

(2) 散乱の一次近似とその限界

本研究の呈色モデルでは、次の三つの現象を無視できるとする仮定[17-20]を踏襲する。

それは、(a) 散乱された光が反射される現象、(b) 反射された光が散乱される現象、および(c) 光が2回以上の散乱(多重散乱)を受ける現象、である。これらは、湖底乱反射のアルベドが1に比べて十分に小さく、また水の分子散乱係数および懸濁物質のミー散乱係数の双方が十分に小さいことから、近似として成り立つと考える。すなわち、多重散乱あるいは反射と散乱の双方を受けた光は、光が届く観測点で極めて弱い強度しか与えないとする。

ただし、上記の仮定は、観測点が湖面から十分に遠い場所にあるときに有効であるが、多重散乱が無視できないときには成り立たない。例えば、水中で光を観測する場合、光の経路の直進方向に近い散乱角で光が散乱されることも考慮する必要がある。このような場合、懸濁物質によるミー散乱の位相関数が非常に大きくなり、多重散乱の効果が無視できず、著者らの近似が適用できなくなる。

3.2. 光線逆方向追跡法

本研究では湖面上の光射出点を求める前報[17]以来の方法を踏襲する。これまでの和文報告ではこの方法に特に命名していなかったが、今後のために前報[19]での“reverse ray tracing method”を「光線逆方向追跡法」と訳して使うことにする。

いま、湖底乱反射点あるいは湖内散乱点を設定すると、直達日射条件では太陽光線は平行と考えてよいから、対応する湖面入射点が一意に決まる。さらに水面よりも上に観測点を設定すると、湖面から光が射出するとき、水面が水平な平面である場合は、水平方向で方向を変えず、鉛直方向で方向を変える。このときに

湖面上の光射出点を求める方法は多田村ほか[24]により報告されている。前報[17]では、光射出点を求める方法として3次元のスネルの法則[29]を適用し、観測点座標および反射・散乱点座標と水の空気に対する相対屈折率を含んだ4次方程式を導いた。この方程式を適用して水中の乱反射点あるいは散乱点から湖面へ進む光の水中の方向ベクトルを求めることができる。

このように光の経路をたどる光線逆方向追跡法によって、日射が湖面に入射するときの座標と水中の乱反射点および散乱点から発せられた光が湖面上に射出するときの座標を求めることができる。光がたどる経路に応じて、その強度が決まることから、最終的に湖面上の光の強度分布を求めることができる。

3.3. 湖面上の光の放射輝度

(1) 離散的な放射輝度の計算

以後、「放射輝度(の式)」および「光強度(の式)」という二つの表現が混在するが、本稿では後者は放射輝度にスケールリングファクタを乗じた量で、RGB値として観測される量に関するものを指す。なお、光学用語の「放射強度」およびこれの測光量である「光度」は、それぞれ「放射輝度」あるいはその測光量である「輝度」とは別の次元の量であり、本稿の「光強度」とは無関係である。

前報[17-20]に記述したとおり、光の経路が決定されると、湖面への入射角、湖面からの射出角が決まるため、これらの入射・射出に対して、フレネル反射係数が与えられる[13]。また、入射光に対する散乱光の光束の角度である散乱角も決まるため、散乱の位相関数も決定される。これらにより、離散的な湖底乱反射点あるいは湖内散乱点に対応する湖面上の離散的な光射出点について、光強度が放射輝度で与えられる。

(2) 湖面上の放射輝度の分布

前報[17-20]のとおり、湖面上の離散的な光射出点近傍で光の放射輝度が2次元正規分布すると仮定し、この分布がすべての乱反射点および散乱点からの寄与についての重ね合わせとなり、湖面上の放射輝度分布となると仮定する。また前報[20]で、湖面上において離散的な光射出点の間隔を無限小に取った場合、湖面上の光射出点についての放射輝度の積分が、この光射出点に対応する湖底乱反射点あるいは湖内散乱点の水平方向座標についての積分に置換できることを、輝度保存則を仮定して示した。本研究では、この証明を輝度保存則を仮定せずに検討したことから、その概要を3.5節で、証明を付録に記述する。

(3) 放射輝度分布と画像上の湖面呈色などの分布を計算する考え

著者らの前報では明記してこなかったが、湖面上の放射輝度分布の計算法と画像上の呈色の計算法の違いを以下に整理しておく。

離散的な湖底乱反射点および湖内散乱点からの湖面上の光射出点により与えられる湖面上の放射輝度分布は、湖面上の光射出点近傍の放射輝度の正規分布の重ね合わせであり、示量性の物理量が重ね合わせの原理に従うと考える。すなわち、重ね合わせの結果、湖面上の座標格子の各点に対して放射輝度分布、すなわち色の分布が得られる。

これに対して、湖面上の座標格子各点の色の分布を透視投影により画像ピクセルに表現するときには、色の情報を持つ湖面上の座標格子の各点を画像ピクセル座標に変換し、補間によりピクセル上の座標格子の各点に対して色の分布を計算する。

このように、重ね合わせの原理と補間を使い分けて、離散的な湖面直下の光射出点における放射輝度から湖面画像を再現する。

3.4. 湖盆形態と観測点

吉村ほか[21]で記述されているように、青池は漏斗状の湖盆形態をしている。このことから、前報までは、仮想的な回転放物面の湖底を採用した[17-20]。本研究ではこの湖盆形状(Fig. 3)を踏襲する。

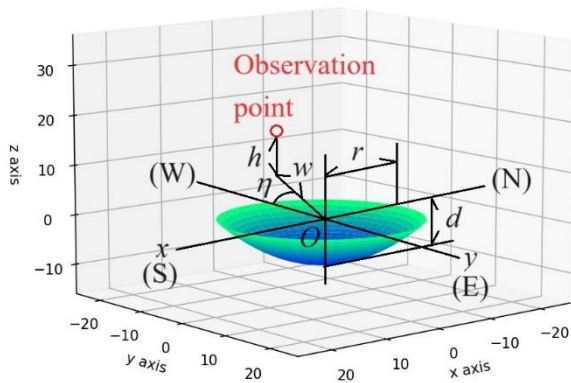


図3. 青池の湖盆形態モデル. ここでは、回転放物面の湖盆を仮定している。

Fig. 3. A basin model for Ao-ike Pond, where a paraboloid basin shape is assumed.

3.5. 放射輝度の式の改良

(1) 放射輝度の式の修正

ここでは、前報[20]で考慮しなかった観測点の位置による放射輝度の補正を行い、観測される放射輝度のモデル式を改良する。この結果、湖底乱反射光の放射

輝度が前報[20]から変更される。Fig. 4 に例として散乱の場合の概念図を示す。

前報[20]で示した、水の分子散乱および懸濁物質のミー散乱についての離散的な散乱点に対する放射輝度の式は以下のものである。

湖面への入射前の大気中における入射光の法線面放射照度 E 、入射光についての大気から水への界面のフレネル反射係数 R_1 、水中における消散係数 $c(\lambda)$ 、湖面入射点 $T_2(x_2, y_2, 0)^t$ から散乱点 $T_5(x_n, y_n, z_n)^t$ までの距離 l_3 、散乱点 T_5 から湖面射出点 $T_3(x_3, y_3, 0)^t$ までの距離 l_4 、散乱角 Θ 、体積散乱関数 $\beta(\Theta)$ 、散乱で考える微小体積区間の z 成分 Δz 、ベクトル $\vec{T_5 T_3}$ と鉛直方向の単位方向ベクトル \mathbf{k} のなす角 Ψ 、とすると、湖面上の光射出点直下における放射輝度 L_1 は次式で与えられる。

$$L_1 = \frac{E(1 - R_1)\beta(\Theta)\Delta z}{\cos \Psi} \times \exp\{-c(\lambda)(l_3 + l_4)\} \quad (1)$$

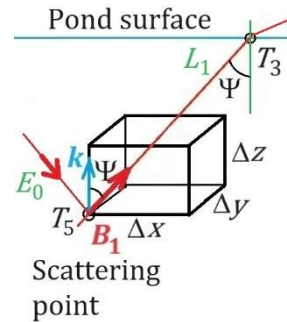


図4. 散乱の概念図.

Fig. 4. Conceptual figure of scattering.

なお、前報[20]ではこの式の導出過程について記述していないので、付録に示す。

湖面の光射出点直上の放射輝度 L_2 は、水の空気に対する相対屈折率 n_{12} 、水から大気への界面のフレネル反射係数 R_2 とすると、輝度の n^2 則により、 $(1 - R_2)/n_{12}^2$ に比例すると考えられる。さらに、散乱点から発せられた光が湖面に Fig. 4 の角度 Ψ で到達する場合、湖面が受ける光のエネルギー（強度）は、 $\cos \Psi$ に比例すると考えられる。以上から、放射輝度 L_2 は次式で与えられると仮定する。

$$L_2 = \frac{1 - R_2}{n_{12}^2} \cos \Psi \cdot L_1 \quad (2)$$

なお、この $\cos \Psi$ の考慮は、多田村ほか[24]を参考にした。

以上から、観測点で観測される散乱光の放射輝度 L_3 は次式で表され、 $\cos \Psi$ の因子は相殺する。

$$L_3 = E \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{n_{12}^2} \beta(\Theta) \Delta z \times \exp\{-(l_3 + l_4)c(\lambda)\} \quad (3)$$

(3)式が、光散乱についての観測点から見た湖面の放射輝度の式である。

観測される湖底乱反射についても、乱反射光の放射輝度に $\cos \Psi$ の因子が乗せられるが、Lambertian (完全拡散的) な湖底を仮定した場合、反射直後の乱反射光の放射輝度は散乱と異なり分母に $\cos \Psi$ を含まず、(3)式の扱いとは異なり、この因子は相殺せず、前報の式と異なる。

(2) 離散的な湖底乱反射点および湖内散乱点からの光の放射輝度の式の誘導

ここでは、上述の考えにより、観測点から見た、離散的な湖底乱反射点および湖内散乱点からの光の放射輝度の式を誘導する。

湖底乱反射について、湖底の光散乱点を $T_1(x_1, y_1, z_1)^t$ とする。このとき、湖面上の光入射点 T_2 は、平行光線と見なせる直達日射の方向ベクトルと湖底乱反射点座標 T_1 から一意的に求まる。なお、このことは、散乱点を与えられた場合にも同様であり、一意的に湖面入射点が定まる。

また、乱反射光の湖内の光路長は、光入射点 T_2 から湖底乱反射点 T_1 までの距離 l_1 と、湖底乱反射点 T_1 から光射出点 T_3 までの距離 l_2 の和であり、乱反射光は、この距離 $l_1 + l_2$ と消散係数 $c(\lambda)$ による指数関数で減衰する。

以上から、離散的な湖底乱反射点 T_1 から観測点に届く波長 λ の光の放射輝度 $L_{refl}(x_1, y_1, z_1, \lambda)$ は、波長 λ における水の吸光係数 $A_w(\lambda)$ 、水の分子散乱係数 $b_w(\lambda)$ 、波長に依存しない懸濁物質のミー散乱係数 b_{Mie} 、現象論的減衰係数 k_1 とすると、消散係数 $c(\lambda) = A_w(\lambda) + b_w(\lambda) + b_{Mie} + k_1$ であり、湖底乱反射アルベド ρ とすると、(4)式で与えられる。

$$L_{refl}(x_1, y_1, z_1, \lambda) = E \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{n_{12}^2} \frac{\rho}{\pi} \times \exp\{-(l_1 + l_2)c(\lambda)\} \cos \Psi \quad (4)$$

(4)式は、前報[20]で示されている湖底乱反射に対する光強度式の中の放射輝度の項に $\cos \Psi$ の因子を乗じたものであり、放射輝度を表す。この式が前報[20]の式からさらに異なる点は、放射輝度を無次元の観測量

に変換するスケーリングファクタを含まないこと、および分光放射照度ではなく放射照度で記述されていることであり、分光放射照度の扱いは3.6節で後述する。

次に、散乱光に対する放射輝度の式を誘導する。水の分子散乱の位相関数 $\tilde{\beta}_w(\Theta)$ 、懸濁物質のミー散乱の位相関数 $\tilde{\beta}_{Mie}(\Theta)$ とすると、離散的な散乱点 T_5 から観測点に届く波長 λ の光の放射輝度として、水の分子散乱による $L_w(x_n, y_n, z_n, \lambda)$ および懸濁物質のミー散乱による $L_{Mie}(x_n, y_n, z_n, \lambda)$ は、(3)式からそれぞれ(5)(6)式で与えられる。

$$L_w(x_n, y_n, z_n, \lambda) = E \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{n_{12}^2} b_w(\lambda) \tilde{\beta}_w(\Theta) \Delta z \times \exp\{-(l_3 + l_4)c(\lambda)\} \quad (5)$$

$$L_{Mie}(x_n, y_n, z_n, \lambda) = E \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{n_{12}^2} b_{Mie} \tilde{\beta}_{Mie}(\Theta) \Delta z \times \exp\{-(l_3 + l_4)c(\lambda)\} \quad (6)$$

(5)(6)式は放射輝度を表し、前報[20]で示されている水の分子散乱および懸濁物質のミー散乱に対する光強度式とは異なり、放射輝度を無次元の観測量に変換するスケーリングファクタを含まず、また分光放射照度ではなく放射照度で記述されている。(4)式と同様に、分光放射照度の扱いは3.6節で後述する。

(3) 離散的な湖底乱反射点および湖内散乱点からの光が湖面上で与える放射輝度の分布

ここでは、(4)(5)(6)式で与えられる離散的な湖底乱反射点や湖内散乱点から発せられ観測点で観測される光の放射輝度を、湖面上で連続的に分布する放射輝度へ変換する方法を述べる。この考え方は、前報[17-20]を踏襲している。

3.3節で記したように、著者らは既報で、湖面上の光射出点に与えられる離散的な放射輝度は、その光射出点近傍で2次元正規分布をとると考えた[17-20]。この考えによれば、湖面の放射輝度分布は、光射出点について放射輝度を積分することで得られる。また、光射出点が離散的な場合には、光射出点座標について和を取って求めることになる。

著者らは前報[19,20]で、観測点が湖面から十分に離れている場合には、この湖面上の光射出点についての積分あるいは和が、湖内の乱反射点における面積区間あるいは湖内散乱点における体積区間の水平成分についての積分や和に近似的に置換できることを検討した。

本稿の付録で、その置換可能性を証明する。なお、前報[20]では、この積分変数の置換可能性を輝度保存則および湖面上の放射輝度の2次元正規分布の仮定のもとで検討した。しかし、これは湖面における射出前だけの議論になっており、射出後に観測される光の考察としては不十分であったと考える。このため、本稿では輝度保存則を仮定せず証明する。

ここでは、まず湖面上の放射輝度が2次元正規分布をとると仮定する。この点は前報[20]と同じである。また、そのほかに、3.2節の光線逆方向追跡法で得られる光の湖面上の光射出点の座標から、積分変数の置換可能性を示す。すなわち、この証明は3次元のスネルの法則[29]を前提とし、その議論は湖面上の光射出点座標に限っており、放射輝度の知見を要しない。

本稿の付録に記述した証明では、単純化のため湖内の散乱のみを扱うが、考え方は湖底乱反射の場合に拡張可能である。

ここで、本研究の仮定を述べる。光が散乱点 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ から、 $z = 0$ の平面である湖面上の光射出点 $T_3(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, 0)^t$ を経由して観測点 T_4 へ進むとする。ここでは、前節で記した $T_3(x_3, y_3, 0)^t$ を散乱点 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ に対応させて、 $T_3(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, 0)^t$ と書き改める。

前報[20]により、2次元正規分布密度関数を次式で定義する。

$$D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(X - \bar{X}_i)^2 + (Y - \bar{Y}_i)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (7)$$

ここで、 X および Y は湖面上の任意の点の座標を示し、 σ は正規分布の標準偏差を示す。

次に、(8)式で湖面上の任意の点における波長 λ の光の放射輝度分布 $L(X, Y, \lambda)$ が与えられると仮定する。

$$L(X, Y, \lambda) = \sum_{x_i, y_i, z_i} L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda) D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) \Delta x \Delta y \quad (8)$$

ここでは、湖内の散乱点の水平方向の座標 x_i および y_i の均一な間隔 Δx および Δy とし、 $L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda)$ は離散的な散乱点に対応する湖面直上の光射出点における放射輝度である。

(8)式は、湖面上の光射出点についての2次元微小間隔 $\Delta\bar{X}\Delta\bar{Y}$ が湖内散乱についての体積区間の水平成分 $\Delta x \Delta y$ と近似的に等しいとする次式から導かれる。これを付録で証明する。

$$\Delta\bar{X}\Delta\bar{Y} \cong \Delta x \Delta y \quad (9)$$

(4) 各呈色要因による光強度分布の表式

以上から、湖底乱反射についての湖面上放射輝度の分布 $L_{refl}(X, Y, \lambda)$ 、湖内の水の分子散乱についての分布 $L_w(X, Y, \lambda)$ 、懸濁物質のミー散乱についての分布 $L_{Mie}(X, Y, \lambda)$ およびこれらの重ね合わせである和 $L(X, Y, \lambda)$ が、各波長 λ において、それぞれ次のように表される。

$$L_{refl}(X, Y, \lambda) = \sum_{x_i, y_i, z_i} L_{refl}(x_i, y_i, z_i, \lambda) D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) \Delta x \Delta y \quad (10)$$

$$L_w(X, Y, \lambda) = \sum_{x_i, y_i, z_i} L_w(x_i, y_i, z_i, \lambda) D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) \Delta x \Delta y \quad (11)$$

$$L_{Mie}(X, Y, \lambda) = \sum_{x_i, y_i, z_i} L_{Mie}(x_i, y_i, z_i, \lambda) D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) \Delta x \Delta y \quad (12)$$

$$L(X, Y, \lambda) = L_{refl}(X, Y, \lambda) + L_w(X, Y, \lambda) + L_{Mie}(X, Y, \lambda) \quad (13)$$

(10)(11)(12)式で、 $(x_i, y_i, z_i)^t$ は離散的な乱反射点あるいは湖内散乱点を示す。なお、本研究では3.1節で述べた散乱の一次近似をしているために、(13)式のとおり、各呈色要因を重ね合わせとすることが可能である。

3.6. 光強度式から RGB 値を計算する方法および当てはめ

(1) RGB 値の計算

本研究では、著者らの既報[20]を踏襲し、放射輝度分布の式(10)(11)(12)中の離散的な放射輝度を表す(4)(5)(6)式において、放射照度 E を分光放射照度 $E'(\lambda)$ (次元: [放射照度][波長]⁻¹) に置き換えて各波長についてその和を取り、放射輝度を求めて等色関数を乗算し、そして波長で積分して三刺激値を得ることとする。ここで、三刺激値とは、色を構成する RGB 値と線形変換の関係にある[30]もので、もとの光強度から得られるものである。この三刺激値から求めた理論的な線形 RGB 値は、画像から抽出した線形 RGB 値と比較できる。

具体的には、まず(13)式で与えられる放射輝度分布に次の(14)式の係数 $1/a$ [19,20]を乗じ、[放射輝度][波長]⁻¹の次元の観測量を、[波長]⁻¹の次元の量に変換する。

$$\frac{1}{a} = 255 \times F_s \beta'_1 \beta_2 \times K_m \quad (14)$$

ここで、 $F_s = 1.58 \times 10^{-3} \text{ cd}^{-1} \text{ m}^2$ は単位輝度あたりの出力値、 β'_1 はデジタルカメラに固有の感度係数、 β_2 は明るさの因子、 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ は放射量から測光量への変換係数、である。

次に、これに波長 λ_j における等色関数 $\bar{x}(\lambda_j)$ 、 $\bar{y}(\lambda_j)$ 、 $\bar{z}(\lambda_j)$ を乗じ、波長で積分して、湖面上の任意の点における無次元の三刺激値 $X_1(X, Y)$ 、 $Y_1(X, Y)$ および $Z_1(X, Y)$ が得られる。これらから、湖面上座標 $(X, Y, 0)^t$ に対する線形 RGB 値 $R(X, Y)$ 、 $G(X, Y)$ および $B(X, Y)$ が線形変換により求まることになる[30]。

(2) 分光放射照度

分光放射照度 (放射量) $E'(\lambda)$ については、本研究では前報[17]を踏襲し、以下のようにして求める。

現場における実測から得られた法線面直達照度 (測光量) E_{obs} と予め太陽光の直達日射条件での分光放射照度 (放射量) $f(\lambda)$ から求めた直達日射条件における法線面照度 (測光量) $E_{fine} = 113000 \text{ lx}$ を用いて、 $E'(\lambda)$ を次式で計算する。

$$E'(\lambda) = \frac{E_{obs}}{E_{fine}} f(\lambda) \quad (15)$$

以上から、理論値としての湖面上の線形 RGB 値が求まる。

(3) モデル式による当てはめとモデルパラメータ

本稿でいう「モデルによる当てはめ」とは、前報[17,18]の考えを踏襲するほか、線形 RGB 値の RGB 要素すべてについて行うものとする。

具体的には、モデルパラメータを含む光の放射輝度の式(4)(5)(6)式による放射輝度分布の(10)(11)(12)(13)式から、離散的に段階的に設定したモデルパラメータの組み合わせについて湖面上の線形 RGB 値を求め、これと、実測画像から抽出した線形 RGB 値との差の二乗和 (残差平方和) が最小となるモデルパラメータの組み合わせを検索し、決定する。

また、本研究では、モデル式による当てはめにおいて β_2 を線形 RGB 値の残差平方和が最小となるように自由度を持たせて決定した[18]。

ここで、水の分子散乱と懸濁物質のミー散乱は、どちらも散乱点由来であるが、位相関数および RGB 値の比が異なるため、当てはめでそれらの寄与を分離で

きる。

3.7. 呈色の季節変動

著者らの既報[19,20]で述べたように、青池への日光の入射の状況は、(a) 初春に青池の湖面全体に入射する場合、および (b) 初夏以降に青池上空の木の葉の間を通過した木漏れ日により湖面に光軌跡が生じる場合、の2種類の典型的な状況に分類できる。本報告では、状況 (a) のみを考察する。

3.8. 直散分離による直達日射量の推定および青池の呈色のシミュレーションにおける応用

直散分離とは、日射量の測定値を直達日射量と散乱日射量に分配することを指す。本研究では、宇田川ら[25]の方法を用いて、水平面全天照度 E_{TH} から法線面直達照度 E_{DN} を求めた。以下に、その方法を要約する。

水平面全日射量 I_{TH} に対する法線面直達日射量 I_{DN} と水平面天空日射量 I_{dH} の関係式は次式のとおりである。

$$\begin{aligned} I_{TH} &= I_{DN} + I_{dH} \\ &= I_{DN} \sin \theta + I_{dH} \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 I_{DH} は水平面直達日射量、 θ は太陽高度である。次に、規格化した法線面直達日射量 K_{Dt} および水平面全日射量 K_{Tt} を、太陽定数 $I_0 = 1367 \text{ W m}^{-2}$ を用いて、それぞれ以下のように定義する。

$$\begin{aligned} K_{Dt} &= \frac{I_{DN}}{I_0 \sin \theta} \\ &= \frac{I_{DN}}{I_0} \end{aligned} \quad (17)$$

$$K_{Tt} = \frac{I_{TH}}{I_0 \sin \theta} \quad (18)$$

このとき、(19)式で与えられる K_{Ttc} により場合分けし、規格化した法線面直達日射量 K_{Dt} を規格化した水平面全日射量 K_{Tt} および太陽高度の関数として、(20)(21)式で経験的に表す。

$$\begin{aligned} K_{Ttc} &= 0.5163 + 0.333 \sin \theta \\ &\quad + 0.00803 \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} K_{Dt} &= -0.43 + 1.43 K_{Tt} \\ &\quad (K_{Tt} \geq K_{Ttc} \text{ のとき}) \end{aligned} \quad (20)$$

$$K_{Dt} = (2.277 - 1.258 \sin \theta + 0.2396 \sin^2 \theta) K_{Tt}^3 \quad (K_{Tt} < K_{Ttc} \text{ のとき}) \quad (21)$$

求めた K_{Dt} と(17)式から、法線面直達日射量 I_{DN} の値が計算される。

実測値の水平面全天照度 E_{TH} から水平面全天日射量 I_{TH} への換算は、日射量が 1000 W m^{-2} のときに照度が $E_{fine} = 113000 \text{ lx}$ となる比例関係を用いて、次式で行う。

$$I_{TH} = \frac{1000 \text{ W m}^{-2}}{113000 \text{ lx}} E_{TH} \quad (22)$$

同様に、法線面直達日射量 I_{DN} から法線面直達照度 E_{DN} へは次式で換算する。

$$E_{DN} = \frac{113000 \text{ lx}}{1000 \text{ W m}^{-2}} I_{DN} = \frac{113000 \text{ lx}}{1000 \text{ W m}^{-2}} K_{Dt} I_0 \quad (23)$$

青池の周囲は急峻な崖で囲まれていることから、高度が低い日射は入射せず、青色呈色に影響しないと推定される。よって、太陽高度が高く晴天の時の呈色は、(23)式で求めた法線面直達照度 E_{DN} のみを考慮して再現できると考える。

これにより、(15)式で $E_{obs} = E_{DN}$ と置き換えてシミュレーションに用いることとする。

4. 材料および方法

4.1. 画像撮影に関する機器類

デジタルカメラは、Panasonic 社 DC-TZ90 を使用した。その感度係数決定には、中国の Neewer 社[31]のアルベド 18%の灰色標準紙を用いた。ホワイトバランス係数は、米国 Datacolor 社[32]のカラーチャート SpyderCHECKER24 を用いて決定した。このカラーチャートに含まれる各パレットの sRGB 値はオンラインで公開されている[33]。この画像の一部を Fig.5 に示す。Fig.5 には記号・数字が表示されているが、もとのカラーチャートには表示されていない。

D65 光源として本研究では、20W 蛍光ランプスタータ型色比較・検査用東芝ライテック[34]D65 FL20S-D-EDL-D65 を用いた。照度計は LX-1010B(Zhangzhou WeiHua 社[35])を用いた。



図5. ホワイトバランス係数決定に使用したカラーチャート。

Fig. 5. Color chart used in determination of white balance factors.

4.2. 解析用ソフトウェアと処理法

ここでは、16 ビット符号なし整数の TIFF ファイルを得るため、デジタルカメラが出力する RAW ファイルから画像データファイルへ変換する RAW 現像ソフトウェア RawTherapee [36]を用いた。使用したデジタルカメラは 12 ビット分解能を持つが、16 ビット符号なし整数にすることで、もとの画像データの精度を落とすことなく TIFF ファイルへ変換できた。

さらに、この TIFF ファイルを、OpenCV [37]で頒布されているオープンソースコードに含まれる関数 `imread` を使用して自作プログラム(C++)に読み込んだ。TIFF ファイルに含まれる 16 ビット符号なし整数の sRGB 値の要素を $2^{16}-1$ で除して、sRGB 値の要素の小数とし、この小数を 64 ビットの浮動小数点形式として扱い、バイナリファイルに保存した。その後、Visual Basic (VB)で記述した自作プログラムで、これらの小数を線形 RGB 値の要素としての小数に変換した。ここでは、このデータの扱いの過程では切り捨てをしていないため、デジタルカメラで最初に撮影したときの画像の精度は保たれる。

RawTherapee における RAW 現像条件は、(a) ホワイトバランス設定を同一とし、太陽光で撮影した場合には晴天時の条件である「カメラ」の設定にしたこと、(b) カラーノイズ低減を行ったこと、そして (c) レンズプロファイルによる歪曲収差補正を行ったこと、の 3 点である。これらの設定以外は、色の加工を全く行わなかった。

RAW ファイル解析結果と比較するために、その画像の JPEG ファイルも解析した。解析では圧縮された JPEG データを VB の自作ソフトウェアでビットマップ形式にキャスト変換して sRGB 値を取得し、線形 RGB 値に変換した。この sRGB 値は、8 ビットの符号

なし整数であり、もとのデータが12ビット符号なし整数のRAWデータよりも精度が悪い。

4.3. デジタルカメラの感度およびホワイトバランス係数の決定

(1) 感度係数の決定

暗室内で、18%灰色標準紙をD65光源で照らし、この標準紙の画像を撮影した。同時に、標準紙の近傍で光の照度を測定した。得られた画像のRAWファイルをRAW現像し、sRGB値の小数のバイナリファイルに変換した。感度係数 β'_1 は、その線形RGB値と撮影条件を用いて、前報の方法[20]を、CIPAのISO感度計算法[38]により改変し、決定した。この改変した方法では、前報[19,20]の方法に比べて、感度係数が約105%となった。なお、CIPAの方法[38]で線形RGB値から輝度に比例する量を算出する際には、後述するホワイトバランス係数を考慮し、カメラ出力値の線形RGB値を補正した。

(2) ホワイトバランス係数の決定

前報[20]で、著者らは、フォーレル水色計の画像を用いたホワイトバランス係数の決定法を記したが、本研究では、暗室内でD65光源のもとで得たカラーチャートの画像を解析し、これらの係数を推定した。これにより、次の改良法を試行した。なお、この方法のうち正射影を取る方法は、前報[20]を踏襲した。

まず、カラーチャートの各パレットの光照射画像から線形RGB値(R_A, G_A, B_A)および色度 X_A を計算する。次に、各パレットのsRGB値の文献値[33]に対応する色度 X_B を考える。さらに、色度 X_B と純白の色度 X_W を結ぶ直線 $X_W X_B$ を求め、ベクトル $\vec{X_W X_A}$ の直線 $X_W X_B$ への正射影により点 X'_B を求め、この色度から(R_B, G_B, B_B)に比例する線形RGB値を得る。そして、次式で定義される二つのホワイトバランス係数 w_R および w_G を求める。

$$w_R = \frac{R_A}{R_B} \cdot \frac{B_B}{B_A} \quad (24)$$

$$w_G = \frac{G_A}{G_B} \cdot \frac{B_B}{B_A} \quad (25)$$

これらの w_R および w_G を安定して算出するために、2回の棄却を行った。この棄却法では、各パレットの画像から求めた w_R および w_G の平均値から標準偏差の1倍の範囲外にあるものを因子の推定に用いなかった。なお、モデルによる当てはめやシミュレーションにおいてホワイトバランス係数を考慮する際には、上記の w_R および w_G ではなく、次の(26)(27)式に示

す、Gに対する比に変換した w'_R および w'_B を用いた。この理由は、RGB要素によって輝度に比例する量を定義する式の係数[38]のうち、Gに乗ぜられる係数が最も大きいことから、Gを基準としたためである。

$$w'_R = \frac{R_A}{R_B} \cdot \frac{G_B}{G_A} = \frac{w_R}{w_G} \quad (26)$$

$$w'_B = \frac{B_A}{B_B} \cdot \frac{G_B}{G_A} = \frac{1}{w_G} \quad (27)$$

4.4. 青池画像とその解析法

(1) 撮影条件と観測点

晴天の2024年4月13日に撮影した画像を、画像解析に適用した。青池の画像は、3.7節で述べた(a)の初春の条件で、水平面全天照度 $E_{TH} = 7.2 \times 10^4$ lxの直達日射条件で撮影されたものを用いた。

本研究では、Fig. 6に示す二つの観測点から撮影した画像を解析した。それらは、前報[20]の従来の観測点($\eta = 60^\circ$, $w = 7.9$ m)である第1観測点から撮影した画像、および第2観測点($\eta = 68^\circ$, $w = 7.2$ m)から撮影した画像である。前者の観測点からの画像は11:00, 11:11, 11:27 (JST)に、後者の観測点からの画像は10:59, 11:11, 11:28 (JST)に撮影した。

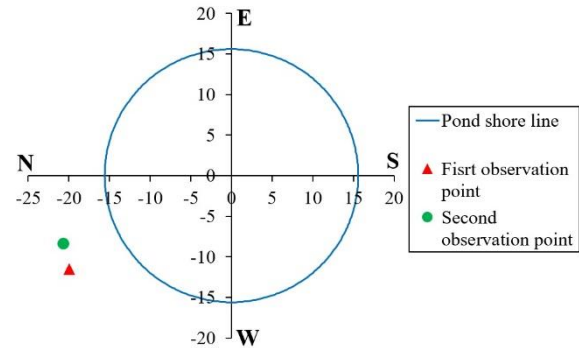


図6. 青池周辺で画像撮影した観測点の表示。

Fig. 6. Two positions around Ao-ike Pond where pictures were taken.

(2) 画像解析法

画像解析は、前報[18]の方法により行った。ここでは、もとの画像の5184×3888の画素を直接解析し、640×480の画素に縮約しなかった。観測された線形RGB値の光物理モデル式による当てはめでは、高速演算を行うためにC++で記述したDLLの関数を使用するVBでコードした自作プログラムを用いた。

湖面上座標は、前報[20]を踏襲し、ホモグラフィ変換行列法で取得した。なお、第1観測点から撮影した画像はRANSAC法で、第2観測点からの画像はDLT

法で、ホモグラフィ変換行列の要素を決定した[39]。これは座標・ピクセル座標の組み合わせが少ない前者ではRANSAC法が有利で、それ以外はDLT法が有利だからである。なお、第2観測点から撮影した画像のホモグラフィ変換行列の取得においては、第1観測点から撮影した画像から座標値が推定できる対岸付近の湖岸3点のピクセル座標を追加して用いた。これは、前報[20]で述べた、青池展望台デッキの柵の位置関係だけを使用した変換行列推定法では、湖岸線の正確な推定が困難だったからである。

画像解析では、湖面の線形RGB値を本研究のモデル式(10)(11)(12)(13)で当てはめ、モデルパラメータを決定した。当てはめにおいては、前報[18]に記述した方法で β_2 を残差平方和が最小となるように決定した。

ここで、ホワイトバランスのRのGに対するエンハンスメント因子 w'_R およびBのGに対するエンハンスメント因子 w'_B を取得できたことから、当てはめとシミュレーションでは、Rを $w'_R R$ で、Bを $w'_B B$ で置き換えた。RGBは理論的に得られた線形RGB値の要素である。

水の可視領域における吸光係数は、Pope and Fry[40]の値を使用した。水の分子散乱の散乱係数および位相関数は、Morel[41]とZhang and Hu[42]の値を採用した。ミー散乱の位相関数は、任意の散乱角における位相関数を計算するため、前報[20]と同じ方法で、位相関数の実験値[13,43]の対数を6次多項式で近似して求めた。

5. 結果

5.1. デジタルカメラの感度係数とホワイトバランス係数の決定

18% 灰色標準紙のRAW画像は照度719 lxで撮影され、このときのデジタルカメラの設定は、絞りf4、露光時間1/60 s、ISO感度400であった。これらのパラメータと画像の照射領域の線形RGB値($R = 55.9$, $G = 81.4$, $B = 117$)を用いて、感度係数を $\beta_1 = 1.54$ と決定した。

また、ホワイトバランス係数として、 $w'_R = 0.907$ および $w'_B = 1.06$ が得られた。

同様の操作をJPEGファイルに対しても行い、感度係数 $\beta_1 = 2.16$ およびホワイトバランス係数 $w'_R = 0.888$, $w'_B = 1.09$ が得られた。

5.2. 青池画像の解析

Fig. 7に、二つの観測点で撮影して得られたRAWファイルおよびJPEGファイル(4条件)から抽出した線形RGB値をモデルで当てはめた結果を示す。また、Fig. 8に原画像を示す。これらの画像は、第1観測点

($\eta = 60^\circ$)では11:00に、第2観測点($\eta = 68^\circ$)では10:59に撮影して求めた。この図には、解析に供したピクセルの位置、デジタルカメラ設定から求めた明暗調整済み画像、およびシミュレーション結果を併記した。Fig. 9に、シミュレーションにより得られた可能な呈色要因のそれぞれの寄与を示す。ここで、それらの要因の寄与を見やすいように、線形RGB値に5倍の因子を乗算して明るく表示させ、比較している。Table 1には、設定し、あるいはシミュレーションで得られた光学パラメータについて、上記4条件での値を示す。

6. 考察

6.1. 当てはめの決定係数

Fig. 7から、値が小さく相対誤差の大きいR以外の線形GB値の当てはめにおける決定係数は、二つの観測点および2種類のファイル形式の4つの場合について、いずれも高いことがわかる。このことから、撮影画像から抽出した線形RGB値は本研究の理論によって概ねよく再現されたことがわかる。

この図から、RAWファイル使用の場合(a)(c)は、線形B値の実測値対理論値のプロットはほぼ直線的であるのに対して、JPEGファイル使用の場合(b)(d)は、プロットが上に凸に湾曲する傾向があった。このことは、JPEGファイル生成時に、B値について非線形的な色の加工があったことを示唆すると考えられる。なお、RAWファイル使用の場合(a)(c)において、線形G値のプロットが1:1の直線から水平方向に傾く分布をしていることがわかるが、この現象の原因は不明である。

6.2. 当てはめで得られたモデルパラメータによる湖面画像の再現と各寄与

Fig. 8およびFig. 9から、青池の青色呈色には、湖底乱反射が大きく寄与し、特に観測点での眺望において湖面中央から手前側で強い青色を与えることがわかった。

これは、光強度式からは、フレネル反射係数および $\cos \Psi$ の効果が寄与しているためと推定される。しかし、より大きな効果としては、湖内に入射する光から湖底乱反射および湖内散乱を経て観測される光が、フェルマーの原理により、乱反射点あるいは散乱点よりも必ず手前側の湖面射出点を通して観測されるため、と考えられる。

また、湖底中央の水深が深く、その付近の乱反射点を経由した乱反射光は、湖底中央の周囲で乱反射された光よりも弱くなる傾向があると考えられ、上述の効果に相乗して、湖面中央の手前で湖底乱反射光が強いと推定される。

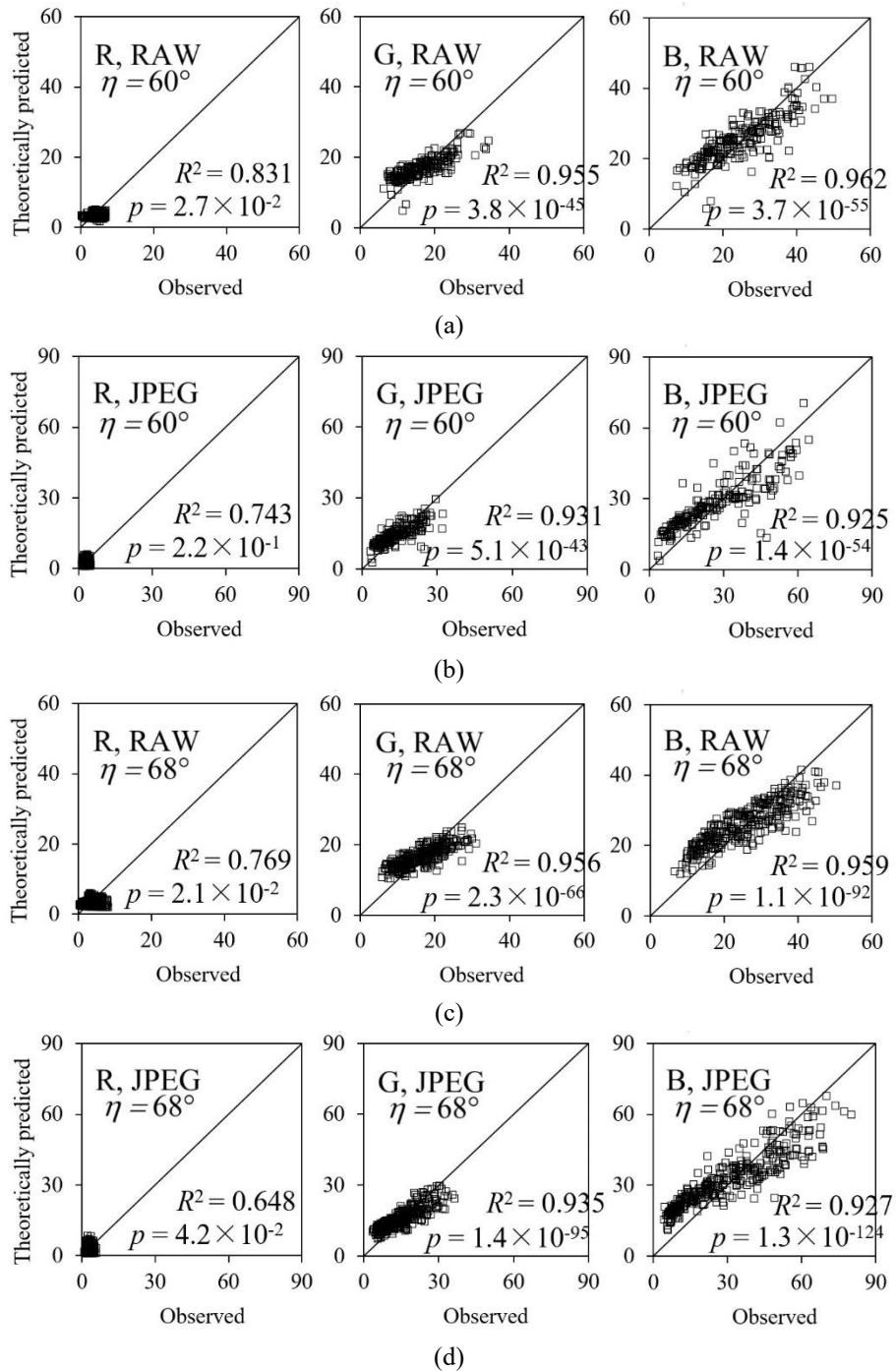


図 7. 青池画像から抽出した線形 RGB 値と呈色要因のモデル式による RGB 値との関係。横軸は線形 RGB 値の実測値，縦軸は理論的に計算された線形 RGB 値。左から右に RGB の順。(a) 第 1 観測点で撮影した 3 画像による，RAW ファイル使用 ($n = 208$)，(b) 同，JPEG ファイル使用 ($n = 197$)，(c) 第 2 観測点で撮影した 3 画像による，RAW ファイル使用 ($n = 304$)，(d) 同，JPEG ファイル使用 ($n = 331$)。

Fig. 7. Fitting situations by coloration model formulas to linear RGB values extracted from Ao-ike Pond images. Horizontal axes indicate observed linear RGB values, while vertical ones show theoretically predicted RGB values. Graphs on RGB are arranged from left to right. (a) Using three pictures of RAW files at the first observation point ($n = 208$), (b) using three pictures of JPEG files at the first observation point ($n = 197$), (c) using three pictures of RAW files at the second observation point ($n = 304$), and (d) using three pictures of JPEG files at the second observation point ($n = 331$).

Observation point and time	File format of analyzed picture file	Original image (TIFF format in case of using RAW file and JPEG format in case of using this file)	Positions of pixels analyzed displayed as yellow squares	Image whose brightness was adjusted	Simulation result
First observation point ($\eta = 60^\circ$) at 1100h	RAW				
	JPEG				
Second observation point ($\eta = 68^\circ$) at 1059h	RAW				
	JPEG				

図 8. 原画像，解析に供したピクセル位置，明暗調整済み画像，および湖面画像のシミュレーション．黄色の楕円線は仮想的な湖岸線を示す．

Fig. 8. Original images, positions of pixels analyzed, images whose brightness were adjusted, and simulations of pond surface images. Yellow ellipse line depicts postulated pond shore.

Observation point and time	File format of analyzed picture file	Image whose brightness was adjusted	Simulation result	Contribution of irregular reflection at pond bottom *	Contribution of molecular scattering by water *	Contribution of Mie scattering by suspended solids *
First observation point ($\eta = 60^\circ$) at 1100h	RAW					
	JPEG					
Second observation point ($\eta = 68^\circ$) at 1059h	RAW					
	JPEG					

図 9. シミュレーションにおける各呈色要因の寄与．* それぞれの要因について 5 倍の明るさで表示．

Fig. 9. Contribution of each coloration mechanism in simulation. * For each coloration mechanism, image brightness was increased by five times.

表 1. 設定し、あるいは得られたモデルパラメータの比較. 共通パラメータ : $r = 15.1$ m, $d = 8.1$ m, $h = 9.5$ m, $E_{TH} = 7.2 \times 10^4$ lx (水平面全天照度).

Table 1. Comparisons of model parameters assumed and obtained by simulations. Common parameters: $r = 15.1$ m, $d = 8.1$ m, $h = 9.5$ m, and $E_{TH} = 7.2 \times 10^4$ lx which means horizontal global solar illuminance.

Symbol (unit)	Meaning	By analyzing pictures at first observation point ($\eta = 60^\circ$)		By analyzing pictures at second observation point ($\eta = 68^\circ$)	
		RAW files	JPEG files	RAW files	JPEG files
w (m)	Horizontal distance from pond shore to observation point	7.9	7.9	7.2	7.2
β'_1	Sensitivity factor of digital camera	1.54	2.16	1.54	2.16
β_2	Brightness factor of image	0.759	0.571	0.632	0.448
w'_R	White balance factor, enhancing R to G	0.907	0.888	0.907	0.888
w'_B	White balance factor, enhancing B to G	1.06	1.09	1.06	1.09
E_{DN} (lx)	Direct normal solar illuminance	3.6×10^4	3.6×10^4	3.6×10^4	3.6×10^4
ρ	Pond bottom albedo	0.011	0.012	0.012	0.016
b_{Mie} (m^{-1})	Mie scattering coefficient	0.059	0.023	0.057	0.025
k_1 (m^{-1})	Phenomenological attenuation factor	0	0	0	0
$w_{Irr,G}$	Enhancement factor of pond bottom albedo, G to B	1.07	0.762	1.04	0.754

水の分子散乱および懸濁物質のミー散乱は、湖底乱反射に比べると青色呈色への寄与が小さいが、前者は湖底中央付近で濃い青色を与え、後者は青色、緑色および白色の混色を呈し、湖面画像の全体の明るさを増加させる寄与があると考えられる。

以上から、青池の青色呈色は、湖底乱反射および水の分子散乱によるものであり、水の光学的性質を考慮したモデルにより、良好に再現されたと考える。

6.3. RAW ファイルと JPEG ファイルを使った場合の当てはめの比較

Table 1 において、RAW ファイルと JPEG ファイルの解析結果を比較すると、2 観測点での撮影画像にほぼ共通の因子は、湖底乱反射のアルベド ρ および現象論的減衰係数 k_1 であった。

特に、湖底乱反射アルベド ρ は、底質として常識的な桁(花石ほか[18])をとると考えた。また、現象論的減衰係数 k_1 はいずれの場合も 0 を与えており、このことは、提案する光物理モデルが、ほぼ過不足なく呈色に関係する光強度を与えたことを意味する。

なお、ミー散乱係数 b_{Mie} および湖底乱反射のアルベドのエンハンスメント比 (G/B) $w_{Irr,G}$ [19,20]は、RAW ファイルを用いた場合と JPEG ファイルを用いた場合とで大きく異なった。これらは、二つの観測点から撮影した画像の RAW ファイルと、対応する JPEG ファイルの解析で、それぞれほぼ同一の値が得られた。これらの結果から、RAW と JPEG ファイルの間で画質

に違いがあると考えられ、6.1 節で述べた線形 B 値の実測値対理論値の非線形なプロットとの関係性も考えれば、JPEG ファイルでは色の加工の影響があると示唆された。

また、Fig. 8 の湖面画像およびシミュレーション結果を比較すると、JPEG ファイルで RAW ファイルよりも緑色が相対的に弱いことが認められ、これがモデルパラメータ推定の違いに影響した可能性がある。しかし、この緑色の有無がデジタルカメラの特性のためかどうかは不明であり、今後、他機種のデジタルカメラを併用して調査を行う必要があると考える。

さらに、画像の明るさを示す β_2 は、RAW ファイル使用の場合では 0.759 (第 1 観測点から) および 0.632 (第 2 観測点から) であった。これは、青池画像の明るさが、理論が示す明るさよりも若干暗いことを意味する。その原因としては、(a) 直散分離による直達日射量を過大評価している、(b) 崖の効果[17]で考慮できていない日射の遮りが存在する、あるいは (c) デジタルカメラの感度係数を過大評価している、などが可能性として考えられる。しかし、明るさの因子 β_2 が上記の値であったことは、採用したモデルが概ね良好に青池の青色呈色を再現することを意味すると考える。

7. 結論

本研究では、画像の生データである RAW 形式の画像ファイルを、以前の JPEG ファイル解析よりも正確

に解析することを試み、青森県・青池の青色呈色機構の物理モデルを検討した。これに併せて湖面上の放射輝度分布の式を改良し、直散分離の方法で呈色に寄与する日射量を評価した。また、従来の観測定点以外の観測点から撮影した画像も解析対象とした。これらについては、以下のとおりである。なお、本稿では、湖面上の放射輝度分布の式の誘導における積分変数の置換可能性についても証明を行った。

まず、RAW 使用においては、使用したデジタルカメラの感度およびホワイトバランス係数をカラーチャートを用いて再決定した。RAW ファイル使用の結果を従来法の JPEG ファイル使用の結果と比較すると、湖面上の放射輝度分布の式のモデルパラメータは、推定結果に違いが生じたものがあった。モデルによる当てはめの結果や違いが生じたパラメータを考察したところ、両者のファイルで画質に違いがあることが示唆された。このほかに、JPEG ファイルのデータ解析結果から、JPEG ファイルにおける非線形的な色の加工の効果が示唆された。これらのことから、画像解析には RAW ファイルを使用すべきであると考えられる。

次に、湖面上の放射輝度分布の式の修正を、湖面における光射出時の湖面への入射角の効果を取り入れて行った。また、直散分離の考えから、法線面直達照度を再評価した。ここで、本研究におけるこれらの個々の結果を著者らの前報[20]と直接的に比較することはできない。なぜならば、本研究では、モデルによる当てはめにおいて放射輝度から線形 RGB 値を求める式に現れる明るさの係数 β_2 に自由度を持たせ、一方、前報[20]では、 $\beta_2 = 1$ として行ったという違いがあるからである。なお、前報[20]では、この自由度を持たせる当てはめを試行した結果、 $\beta_2 < 0.3$ が得られ、物理的に適切な意味をなさない、とした。本研究では、上記2点の改良により、RAW ファイル使用で $\beta_2 \geq 0.63$ が得られた。そして、併せて、当てはめの決定係数が高くなった (RAW ファイル使用時、GB 値で $R^2 > 0.95$)。すなわち、湖面上の放射輝度分布の式の修正と直散分離の導入によって、青森県・青池の青色呈色の理論的再現の精度が高くなったといえる。

また、従来の観測定点 (第1観測点) 以外の観測点 (第2観測点) から撮影した画像を解析した結果、RAW ファイル使用では、湖面上の放射輝度分布の式のモデルパラメータは、従来の観測定点から撮影した画像から得られたものとはほぼ同じ値が得られた。このことは、本研究の呈色の光物理モデルが正しいことの傍証であると考えられる。

以上の検討で得られた、光物理モデルによる当てはめの結果を解釈したところ、青池の青色呈色機構には、

湖底乱反射および水の分子散乱が大きく寄与していることが明らかになった。このことから、水の分子散乱が青色呈色の主原因とした前報の見解が修正された。

これら二つの寄与による青色呈色は水の光学的性質としての赤色光吸収と青色光を強調する散乱によるものであると仮定していた。よって、青池の青色呈色は水そのものの青であると結論される。

参考文献

1. 塚本浩喜・後藤直成・吉原亜悠・高木裕太・新井那莉・林 正能・石坂丞二 (2019): 衛星リモートセンシングを用いた琵琶湖におけるクロロフィル *a* 濃度の推定. 日本リモートセンシング学会誌 **39**: 103-111, <https://doi.org/10.11440/rssj.39.103>
2. Topp SN, Pavelsky TM, Jensen D, Simard M, Ross MRV (2020): Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications *Ross. Water* **12**: 169, <https://doi.org/10.3390/w12010169>
3. Kirk JTO (2010): *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. 3rd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 649p., ISBN 978-0-521-15175-7.
4. Goddijn-Murphy L, Dailloux D, White M, Bowers D (2009): Fundamentals of in Situ Digital Camera Methodology for Water Quality Monitoring of Coast and Ocean. *Sensors* **9**: 5825-5843, <https://doi.org/10.3390/s90705825>
5. Novoa S, Wernand M, Jan H, van der Woerd H (2015): WACODI: A generic algorithm to derive the intrinsic color of natural waters from digital images. *Limnology and Oceanography: Methods*, **3**: 697-711, <https://doi.org/10.1002/lom3.10059>
6. Leeuw T, Boss E (2018): The HydroColor App: Above Water Measurements of Remote Sensing Reflectance and Turbidity Using a Smartphone Camera. *Sensors* **18**: 256, <https://doi.org/10.3390/s18010256>
7. Morel A, Prieur L (1977): Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography* **22**: 709-713, <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
8. Braun CL, Smirnov SN (1993): Why is Water Blue? *Journal of Chemical Education* **70**: 612-614, <https://doi.org/10.1021/ed070p612>
9. Jerlov NG (1976): *Marine Optics*. 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 231p., ISBN 0-444-55294-4.
10. Eyring H, Walter J, Kimball GE (1944): *Quantum Chemistry*. Wiley, New York, USA, 394p.
11. 佐藤信也 (2020): 純水の透明度の計算画像による推計. 陸水学雑誌 **81**: 119-136, <https://doi.org/10.3739/rikusui.81.119>

12. 佐藤信也 (2022): 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, <https://doi.org/10.3739/rikusui.83.171>
13. Mobley CD (1994): *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. Academic Press, New York, USA.
14. Hedley J (2008): A three-dimensional radiative transfer model for shallow water environments. *Optics Express* **16**: 21887-21902, <https://doi.org/10.1364/OE.16.021887>
15. 花石竜治・工藤志保・野澤直史・佐藤裕久 (2016): 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.
16. 花石竜治・大坂直人・柴田めぐみ・野澤直史・佐藤裕久 (2017): 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.
17. 花石竜治・大坂直人・知北和久 (2019): 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, https://doi.org/10.34502/physhydro.1.1_3
18. 花石竜治・大坂直人・知北和久 (2020): 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, https://doi.org/10.34502/physhydro.2.1_25
19. Hanaishi R, Chikita KA (2021): 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, <https://doi.org/10.3390/app11199231>
20. Hanaishi R, Chikita KA (2024): A study on the coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture, Japan: refinement of the image analysis methods. *Limnology* **25**: 125-142, <https://doi.org/10.1007/s10201-023-00734-5>
21. 吉村信吉・木場一夫・尾原信彦・長津一郎 (1934): 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, <https://doi.org/10.4157/grj.10.968>
22. 吉村信吉 (1935): 津軽十二湖の水温, 透明度(2) 津軽十二湖研究(2). 地理学評論 **11**: 437-454, <https://doi.org/10.4157/grj.11.437>
23. 三上 一・石塚伸一・佐藤真理子・今 俊夫・野呂幸男・対馬和浩・阪崎俊壘・早狩敏男・小山田久美子・高柳和弘・澤山修悦・奈良忠明 (1992): 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.
24. 多田村克己・中前榮八郎 (1995): 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, https://doi.org/10.2150/jiej1980.79.8_385
25. 宇田川光弘・木村建一 (1978): 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, https://doi.org/10.3130/aijsaxx.267.0_83
26. 大高明史・高橋友宏 (1999): 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.
27. 松谷善三・小久保清治 (1942): 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, <https://doi.org/10.2331/suisan.11.5>
28. 對馬康夫・日野修次・大高明史・齋藤捷一 (1995): 津軽十二湖湖沼群の水質化学特性. 陸水学雑誌 **56**: 9-18, <https://doi.org/10.3739/rikusui.56.9>
29. 長谷川能三 (2016): ベクトル表記による光の反射・屈折の法則. 大阪市立科学館研究報告 **26**: 31-34.
30. 日本工業標準調査会・審議 (2004): 日本工業規格 JIS X 9204:2004 高精細カラーデジタル標準画像(XYZ/SCID). 日本規格協会, 東京, 24p.
31. Shenzhen Xing Ying Da Industry Co., Ltd. (2024): <https://ca.neewer.com/products/neewer-18-gray-white-card-set-for-white-balance-exposure-value-66600656> (2024年6月29日時点)
32. Datacolor Inc. (2024): <https://www.datacolor.com/> (2024年6月29日時点)
33. Datacolor Japan (2023): <http://www.datacolor.jp/assets/files/SpydWeb> (2024年6月29日時点)
34. 東芝ライテック (2024) https://www.tlt.co.jp/tlt/index_e.htm (2024年6月29日時点)
35. Alibaba.com site (2024): <https://weihuameter.en.alibaba.com/> (2024年6月29日時点)
36. RawTherapee (2023): <https://rawtherapee.com/> (2024年6月29日時点)
37. OpenCV team (2023): <https://opencv.org/> (2024年6月29日時点)
38. CIPA - Cameras & Imaging Products Association: CIPA Standards (2020): CIPA DC-004-Translation-2020 Sensitivity of Digital Cameras. https://www.cipa.jp/std/documents/download_e.html?CIPA_DC-004-2020_E (2024年6月29日時点)
39. Hartley R, Zisserman A (2003): *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 655p., ISBN 978-0-521-54051-3.
40. Pope RM, Fry ES (1997): Absorption Spectrum (380-700 nm) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements. *Applied Optics* **36**: 8710-8723, <https://doi.org/10.1364/AO.36.008710>

41. Morel A (1974): Optical Properties of Pure Water and Pure Sea Water. In Jerlov NG and Nielsen ES (eds) *Optical Aspects of Oceanography*. Academic Press, New York, USA, pp. 1-24, <https://doi.org/10.4319/lo.1975.20.2.0302a>
42. Zhang X, Hu L (2009): Estimating Scattering of Pure Water from Density Fluctuation of the Refractive Index. *Optics Express* **17**: 1671-1678, <https://doi.org/10.1364/OE.17.001671>
43. Petzold TJ (1977): Volume scattering functions for selected ocean waters. In: Tyler JE (ed) *Light in the Sea*. Hutchinson & Ross, Dowden, USA, pp. 152-174.

受付 : 2024 年 7 月 2 日

受理 : 2024 年 10 月 28 日

付録

1. 湖面直下の光射出点における散乱光の放射輝度の式の誘導

ここでは本文(1)式の導出過程を示す。

(1) 散乱前の放射照度の式の誘導

Fig. A1 に概念図を示す。

散乱前の法線面放射照度 E_0 は、湖面入射時の法線面放射照度 E が湖面入射点から散乱点までの光路 l_3 で減衰したものである。この入射時には、大気・水界面でフレネル反射係数により水中へ進入する光強度が規定される。

大気から水への界面のフレネル反射係数 R_1 、消散係数(水の吸光係数、分子散乱係数、懸濁物質のミー散乱係数および現象論的減衰係数の和) $c(\lambda)$ と置くと、

$$E_0 = E(1 - R_1)\exp\{-c(\lambda)l_3\} \quad (A1)$$

ここで、 l_3 は湖面入射点 $T_2(x_2, y_2, 0)^t$ から散乱点 $T_5(x_n, y_n, z_n)^t$ までの距離である。

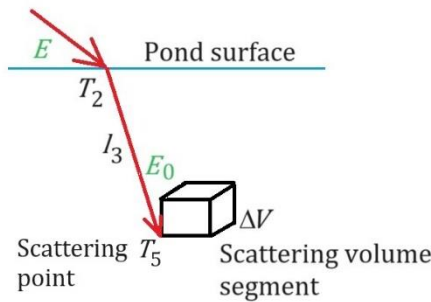


図 A1. 散乱前の光の概念図.

Fig. A1. Conceptual figure of light path before scattering.

(2) 光射出点直下における放射輝度の式の誘導

Fig. 4 (本文中) に概念図を示す。

法線面放射照度 E_0 の平行光線で照らされた微小体積区間 $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ から散乱される光の放射強度 ΔI は、散乱角 θ に依存する体積散乱関数 $\beta(\theta)$ を用いて、次式で表される。

$$\Delta I = E_0 \beta(\theta) \Delta V \quad (A2)$$

この散乱光の散乱直後の放射輝度 L'_1 は、Jerlov[9]により、次式で表される。

$$L'_1 = \frac{\Delta I}{\Delta x \Delta y \cdot \cos \Psi} = \frac{E_0 \beta(\theta) \Delta z}{\cos \Psi} \quad (A3)$$

ここで、Fig. 4 において、直線 $T_5 T_3$ の単位方向ベクトル \mathbf{B}_1 、鉛直方向の単位方向ベクトル \mathbf{k} として、これらのなす角 Ψ とすると、ベクトルの内積の関係から、

$$\cos \Psi = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{k} \quad (A4)$$

である。

よって湖面上の光射出点直下における散乱光の放射輝度 L_1 は次式で与えられる。

$$L_1 = \frac{E_0 \beta(\theta) \Delta z}{\cos \Psi} \exp\{-c(\lambda)l_4\} \quad (A5)$$

ここで、 l_4 は散乱点 $T_5(x_n, y_n, z_n)^t$ から湖面射出点 $T_3(x_3, y_3, 0)^t$ までの距離である。

さらに、(A1)式を用いると、本文中(1)式を与える。

$$L_1 = \frac{E(1 - R_1)\beta(\theta)\Delta z}{\cos \Psi} \times \exp\{-c(\lambda)(l_3 + l_4)\} \quad (1)$$

2. 離散的な湖底乱反射点および湖内散乱点からの光が湖面上で与える放射輝度分布の式の誘導

ここでは、本文(7)式で定義した 2 次元正規分布密度関数で放射輝度を与える(8)式を、輝度保存則を仮定せずに照明する。

証明すべき等式は、本文(9)式(以下に再掲)であるが、1次元における証明ができれば2次元への拡張が可能であり、(9)式が明らかとなることから、本稿では1次元で証明する。

$$\Delta \bar{X} \Delta \bar{Y} \cong \Delta x \Delta y \quad (9)$$

以下で用いる記号は、本文 3.5 節で定義したものと同じである。

$\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ を T_5 から T_3 への光の単位方向ベクトルとすると、花石ほか[17]により、座標 \bar{X}_i および \bar{Y}_i は次式で表される。

$$\bar{X}_i = x_i - \frac{z_i}{b_{1z}} b_{1x} \quad (A6)$$

$$\bar{Y}_i = y_i - \frac{z_i}{b_{1z}} b_{1y} \quad (A7)$$

なお、 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ の近傍の x および y 座標 $x_i + \Delta x$ および $y_i + \Delta y$ を考えるとき、 T_3 近くの対応する光射出点の座標は、(A6)(A7)式を用いて、それぞれ $\bar{X}_i + \Delta \bar{X} = \bar{X}_i + \Delta x$ および $\bar{Y}_i + \Delta \bar{Y} = \bar{Y}_i + \Delta y$ と近似できる。この近似は、 Δx および Δy が小さいこと

から、 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ の近傍で(A6)(A7)式の B_1 の成分が同じであると見なせることによる。これに対して以下の証明では、広い範囲の散乱点 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ について(9)式が成り立つことを示す。

さて、湖面上の光射出点における放射輝度 $L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda)$ を考えると、湖面上の任意の点 $(X, Y, 0)^t$ における放射輝度分布 $L(X, Y, \lambda)$ は次のように計算

できる。すなわち、放射輝度 $L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda)$ に (7)式の密度関数を乗じ、湖面上の光射出点の座標で積分して得られる。この理由は、均一な放射輝度 $L_0(\lambda) \equiv L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda)$ を仮定した場合に、次式のとおり、湖面上の任意の点 $(X, Y, 0)^t$ における放射輝度が再現されるからである。

$$\begin{aligned}
 & \lim_{\Delta\bar{X} \rightarrow 0, \Delta\bar{Y} \rightarrow 0} \sum_{x_i, y_i} \Delta\bar{X} \Delta\bar{Y} L(\bar{X}_i, \bar{Y}_i, \lambda) D(X, Y, \bar{X}_i, \bar{Y}_i) \\
 &= L_0(\lambda) \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{X} \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{Y} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(X-\bar{X})^2 + (Y-\bar{Y})^2}{2\sigma^2}\right\} \\
 &= L_0(\lambda) \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{X} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(X-\bar{X})^2}{2\sigma^2}\right\} \int_{-\infty}^{\infty} d\bar{Y} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(Y-\bar{Y})^2}{2\sigma^2}\right\} \\
 &= L_0(\lambda)
 \end{aligned} \tag{A8}$$

(A8)式では、和を x_i および y_i について取り、ある z_i の層を考えた。ここで、 \bar{X} 、 \bar{Y} は \bar{X}_i 、 \bar{Y}_i を連続的に考えた量である。

次に(9)式の証明を行う。

観測点 $T_4(x_4, y_4, z_4)^t$ が湖内の散乱点 $T_5(x_i, y_i, z_i)^t$ から十分に遠いと仮定すると、次の近似が成り立つ。

$$z_i^2 + z_4^2 \cong z_4^2 \tag{A9}$$

関係式 $C^2 + 1 - 1/n_{12}^2 = b_{1z}^2 > 0$ および(A9)式を用いると、前報[17]の厳密な等式である(A10)式から、近似式(A11)式が与えられる。

$$\begin{aligned}
 & \left[\left(C^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) \left\{ C^2(z_1^2 + z_4^2) + \left(1 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) z_4^2 \right\} + C^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + C^2 + 1 \right) \{ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \} \right]^2 \\
 & \quad - 4C^2 \left(C^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right)^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + C^2 + 1 \right) z_1^2 z_4^2 = 0
 \end{aligned} \tag{A10}$$

$$\left(C^2 + 1 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) \left[z_4^2 \left(C^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) + C^2 \{ (x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 \} \right]^2 - 4C^2 \left(C^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right)^2 z_i^2 z_4^2 = 0 \tag{A11}$$

次に、 $B \equiv C^2 - 1/n_{12}^2 = b_{1z}^2 - 1 < 0$ と定義すると、次式を得る。

$$\left\{ B + \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{ (x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2 \}} \right\}^2 = 4 \frac{B + \frac{1}{n_{12}^2}}{B + 1} B^2 \frac{z_i^2 z_4^2}{\{ (x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2 \}^2} \tag{A12}$$

近似により次式を得る。

$$\begin{aligned}
 B + 1 &= C^2 - \frac{1}{n_{12}^2} + 1 \\
 &\cong 1 - \frac{1}{n_{12}^2}
 \end{aligned} \tag{A13}$$

よって,

$$\begin{aligned}
 \frac{B + \frac{1}{n_{12}^2}}{B + 1} &\cong \frac{B + \frac{1}{n_{12}^2}}{1 - \frac{1}{n_{12}^2}} \\
 &= \frac{n_{12}^2 B + 1}{n_{12}^2 - 1}
 \end{aligned} \tag{A14}$$

関係式 $n_{12}^2 \cong 1.8$ および ca. $|B| < 0.5$ を用いると,

$$\begin{aligned}
 \frac{B + \frac{1}{n_{12}^2}}{B + 1} &\cong \frac{n_{12}^2 B + 1}{n_{12}^2 - 1} \\
 &= 1 + \frac{n_{12}^2(B - 1) + 2}{n_{12}^2 - 1} \\
 &\cong 1
 \end{aligned} \tag{A15}$$

よって, (A12)式は次式で書き直される。

$$\left\{ B + \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}} \right\}^2 = 4B^2 \frac{z_i^2 z_4^2}{\{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}^2} \tag{A16}$$

これと, 関係式 $B < 0$ を用いて, 次式を得る。

$$B + \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}} = \frac{2Bz_i z_4}{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2} \tag{A17}$$

したがって,

$$B = - \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\sqrt{n_{12}^2 - 1} \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}} \right)} \tag{A18}$$

$$C^2 = - \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\sqrt{n_{12}^2 - 1} \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}} \right)} + \frac{1}{n_{12}^2} \tag{A19}$$

$$b_{1z}^2 = - \frac{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\sqrt{n_{12}^2 - 1} \{(x_i - x_4)^2 + (y_i - y_4)^2 + z_4^2\}} \right)} + 1 \tag{A20}$$

ここで、1次元の議論として、 x 軸方向の1次元点列としての散乱点を考えることとすると、 $y_i = y_4 = 0$ とにおいて、(A19)(A20)式から次式を得る。

$$C = \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}} \quad (\text{A21})$$

$$b_{1z} = \sqrt{1 - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}} \quad (\text{A22})$$

ここで、 $b_{1z} > 0$ を用いた。

次に、 $|z_4| \gg |z_i|$ であることから、次式が成り立つ。

$$-\frac{z_4}{C} + \frac{z_i}{b_{1z}} \cong -\frac{z_4}{\sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}}} \quad (\text{A23})$$

よって、ベクトル \mathbf{B}_1 の x 成分は次式で与えられる。

$$b_{1x} = -\frac{x_i - x_4}{z_4} \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}} \quad (\text{A24})$$

かくして、

$$\begin{aligned} \bar{X}_i = x_i + & \frac{z_i(x_i - x_4)}{z_4 \sqrt{1 - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}}} \\ & \times \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)}}} \end{aligned} \quad (\text{A25})$$

次に、 A を次式で定義する。

$$A = \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\} \left(1 - \frac{2z_i z_4}{\{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}}\right)} \quad (\text{A26})$$

また、

$$\left| \frac{2z_i z_4}{(x_i - x_4)^2} \right| \ll 1 \quad (\text{A27})$$

から,

$$A \cong \frac{(x_i - x_4)^2}{n_{12}^2 \{(x_i - x_4)^2 + z_4^2\}} \quad (\text{A28})$$

ゆえに次式を得る。

$$\sqrt{\frac{\frac{1}{n_{12}^2} - A}{1 - A}} \cong z_4 \sqrt{\frac{1}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \quad (\text{A29})$$

よって, (A25)式から

$$\bar{X}_i = x_i + \frac{z_i(x_i - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \quad (\text{A30})$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_{i+1} &= \bar{X}_i + \Delta X \\ &= x_i + \Delta x + \frac{z_i(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i + \Delta x - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \end{aligned} \quad (\text{A31})$$

(A31)式を整理するために, その右辺第3項の分母を考える。

$$\begin{aligned} &\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i + \Delta x - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \\ &\cong \sqrt{(n_{12}^2 - 1)\{(x_i - x_4)^2 + 2\Delta x(x_i - x_4)\} + n_{12}^2 z_4^2} \\ &= \sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \times \sqrt{1 + \frac{2(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \end{aligned} \quad (\text{A32})$$

この式から, (A31)式の右辺第3項は,

$$\begin{aligned} &\frac{z_i(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i + \Delta x - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \\ &= \frac{z_i(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \left\{ 1 + \frac{2(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \right\}^{-1/2} \end{aligned} \quad (\text{A33})$$

ここで, 次の近似的関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 \left\{ 1 + \frac{2(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \right\}^{-1/2} &\cong 1 - \frac{1}{2} \times \frac{2(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \\
 &= 1 - \frac{(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \quad (\text{A34})
 \end{aligned}$$

よって、(A31)式の右辺第3項は、

$$\begin{aligned}
 &\frac{z_1(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i + \Delta x - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \\
 &\cong \frac{z_1(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \left\{ 1 - \frac{(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \right\} \quad (\text{A35})
 \end{aligned}$$

であるが、 Δx が小さい条件で、それについての1次までを取ると、

$$\begin{aligned}
 &\frac{z_1(x_i + \Delta x - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} \times \left\{ 1 - \frac{(n_{12}^2 - 1)\Delta x(x_i - x_4)}{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2} \right\} \\
 &\cong \frac{z_1(x_i - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} + \frac{n_{12}^2 z_i z_4^2}{\{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2\}^{3/2}} \Delta x \quad (\text{A36})
 \end{aligned}$$

ゆえに、

$$\bar{X}_{i+1} \cong x_i + \Delta x + \frac{z_i(x_i - x_4)}{\sqrt{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2}} + \frac{n_{12}^2 z_i z_4^2}{\{(n_{12}^2 - 1)(x_i - x_4)^2 + n_{12}^2 z_4^2\}^{3/2}} \Delta x \quad (\text{A37})$$

これが散乱点座標 $x_i + \Delta x$ に対応する光射出点の座標である。

$(x_i - x_4)^2 \gg z_4^2$ が成り立つとき、

$$\bar{X}_{i+1} \cong x_i + \left\{ 1 - \frac{n_{12}^2 z_i z_4^2}{(x_i - x_4)^3 (n_{12}^2 - 1)^{3/2}} \right\} \Delta x - \frac{z_i}{\sqrt{n_{12}^2 - 1}} \quad (\text{A38})$$

また、(A30)式から、 $(x_i - x_4)^2 \gg z_4^2$ が成り立つとき、

$$\bar{X}_i \cong x_i - \frac{z_i}{\sqrt{n_{12}^2 - 1}} \quad (\text{A39})$$

である。以上、(A38)(A39)式から、

$$\begin{aligned}
 &\Delta \bar{X} \\
 &= \bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i \\
 &\cong \left\{ 1 - \frac{n_{12}^2 z_i z_4^2}{(x_i - x_4)^3 (n_{12}^2 - 1)^{3/2}} \right\} \Delta x \quad (\text{A40})
 \end{aligned}$$

これが求める関係式であり、散乱点座標の間隔と湖面上の光射出点の間隔との関係を表している。

よって近似を用いた(A40)式への誘導において、湖面上の光射出点の間隔 $\Delta\bar{X}$ は、離散的な散乱点の間隔の水平成分 Δx とほぼ等しいことが示された。この間隔 $\Delta\bar{X}$ は、(A40)式から、詳細には屈折率と散乱点の深さ、観測点座標に依存する。

次に、近似解および厳密解により与えられる座標の比較を行う。

Table A1 は、 $z_i = -1, -3$ および -5 について、 x_i を変えて、(A30)式を近似解として求めた場合と(A10)式を DKA 法で数値的に解き厳密解として求めた場合について、 \bar{X} とその間隔 $\Delta\bar{X}$ を比較している。ここで、数値計算は $x_4 = 30$, $z_4 = 10$, および $n_{12} = 1.333$ の条件で行った。なお、実際の青池のパラメータは、本研究の観測点[20]については、 $\sqrt{x_4^2 + y_4^2} \cong 23 \text{ m}$ および $z_4 = 9.5 \text{ m}$ である。

Table A1 は近似解から得られた \bar{X} が厳密解による

ものとはほぼ同じ値を取ることを示し、このことは(A30)式が妥当であることを示す。また、浅い z_i における厳密解と近似解からはほとんど同一の $\Delta\bar{X} \cong 2$ が得られるが、深い z_i において近似解を用いて得られた $\Delta\bar{X}$ は、 Δx からわずかに差を生じている。

以上から、近似式(A30)は、散乱点の座標と光射出点座標の間隔の傾向を与えると結論される。この近似式から、さらに近似によって求めた湖面上の光射出点の間隔と散乱点座標の間隔の関係式(A40)から、 $|(x_i - x_4)^3| \gg |z_i z_4^2|$ の場合、 $\Delta\bar{X} \cong \Delta x$ が成り立つことが示される。よって、積分の置換の妥当性が証明されたと考える。

上記の証明は 1 次元で行い、 $\Delta\bar{X} \cong \Delta x$ の結果が得られたが、2次元への拡張 $\Delta\bar{X}\Delta\bar{Y} \cong \Delta x\Delta y$ (本文(9)式)は、これらの変数が独立なことから、直截的にできる。

以上の考察から、湖面上の光射出点の座標についての積分が湖内の光散乱点についての積分に置き換えられることが示された。

表 A1. 湖内の散乱点座標 x_i を変えた ($\Delta x = 2$) ときの湖面上の光射出点の座標 \bar{X} とその間隔 $\Delta\bar{X}$ を、近似を用いた場合とそうでない場合で比較.

Table A1. Comparisons of coordinates \bar{X} of light emission points and their intervals $\Delta\bar{X}$ on the pond surface obtained with and without approximations when various x_i of coordinates of scattering points inside pond are taken by $\Delta x = 2$.

x_i	$z_i = -1$				$z_i = -3$			
	Exact solution		Approximate solution		Exact solution		Approximate solution	
	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$
-16	-14.95	2.00	-14.92	1.99	-12.88	1.99	-12.77	1.99
-14	-12.95	1.99	-12.93	2.00	-10.89	1.98	-10.78	1.98
-12	-10.96	2.00	-10.93	1.99	-8.91	1.99	-8.80	1.98
-10	-8.96	1.99	-8.94	1.99	-6.92	1.98	-6.82	1.98
-8	-6.97	2.00	-6.95	2.00	-4.94	1.98	-4.84	1.98
-6	-4.97	1.99	-4.95	1.99	-2.96	1.98	-2.86	1.97
-4	-2.98	1.99	-2.96	1.99	-0.98	1.97	-0.89	1.97
-2	-0.99	2.00	-0.97	1.98	0.99	1.98	1.08	1.96
0	1.01	1.99	1.01	1.99	2.97	1.97	3.04	1.95
2	3.00	1.99	3.00	1.98	4.94	1.97	4.99	1.95
4	4.99	1.99	4.98	1.98	6.91	1.97	6.94	1.94
6	6.98	1.99	6.96	1.97	8.88	1.97	8.88	1.92
8	8.97	1.99	8.93	1.97	10.85	1.96	10.80	1.91
10	10.96	1.99	10.90	1.97	12.81	1.96	12.71	1.90
12	12.95	1.99	12.87	1.95	14.77	1.96	14.61	1.86
14	14.94	1.98	14.82	1.95	16.73	1.95	16.47	1.84
16	16.92	1.99	16.77	1.94	18.68	1.95	18.31	1.81
x_i	$z_i = -5$							
	Exact solution		Approximate solution					
	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$	\bar{X}	$\Delta\bar{X}$				
-16	-10.85	1.98	-10.61	1.97				
-14	-8.87	1.97	-8.64	1.98				
-12	-6.90	1.96	-6.66	1.97				
-10	-4.94	1.97	-4.69	1.96				
-8	-2.97	1.96	-2.73	1.96				
-6	-1.01	1.96	-0.77	1.95				
-4	0.95	1.96	1.18	1.95				
-2	2.91	1.95	3.13	1.94				
0	4.86	1.95	5.07	1.92				
2	6.81	1.94	6.99	1.91				
4	8.75	1.95	8.90	1.90				
6	10.70	1.93	10.80	1.87				
8	12.63	1.93	12.67	1.85				
10	14.56	1.92	14.52	1.82				
12	16.48	1.92	16.34	1.78				
14	18.40	1.91	18.12	1.73				
16	20.31	1.90	19.85	1.68				

2024 年度会務報告

運営委員長・知北和久

I. 全国大会の開催

2024 年度陸水物理学会第 45 回大会は、2024 年 12 月 7 日 (土)～8 日 (日) に出島メッセ長崎を会場に開催された (実行委員長:長崎大・利部 慎氏)。大会には、北は北海道から南は長崎県まで、9 名の学生・院生を含む計 30 名の参加があり、合計 20 件の研究発表があった。その後、総会、学会賞授与式、および研究交流会が開催され、12 月 8 日には、野外巡検 (案内人・長崎大学環境科学部 利部 慎氏) が島原半島ジオパーク等 (雲仙市・島原市・南島原市) で実施された。開催中は、天候に恵まれ、研究発表での活発な討論、巡検では利部慎氏による丁寧な解説と地元ならではの話がなされた。

II. 運営委員会報告

全国大会の開催に先立つ 2024 年 12 月 6 日 (金) に、亜紗本店で運営委員会が開催された。出席者は 10 名であった。

議題:

- 1) 次期会長について
 - ・現・鈴木会長の再任が了承された (任期は 2025 年 4 月 1 日～2028 年 3 月 31 日の 3 年間)
- 2) 2024 年度学会賞候補者について
 - ・小野寺選考委員長・藤井論文賞選考委員のコメントに基づき、下記の会員に授与することが承認された。
功績賞: 戸田 孝氏, 学術賞: 石井吉之氏,
論文賞: 大沢信二氏, 奨励賞: 濱 侃 氏
特別賞: 中尾欣四郎氏, 奥田節夫氏, 新井 正氏
- 3) 2025 年度の全国大会開催地について
 - ・研究発表会の候補地として、「法政大学」(世話人, 方正大学・小寺浩二氏) が了承された:
日 程: 2025 年 11 月 22 日 (土)～23 日 (日)
巡検先: 三宅島、御蔵島等
- 4) 要旨集と Waternews のデジタル化と J-Stage へのアップロード状況
 - ・大八木英夫会員の提案により、デジタル化について今大会の収支に応じて予算化することが承認された。
- 5) 運営委員の退任について
 - ・一人の運営委員の退任が了承された。
- 6) その他
 - ・特になし

報告:

- 1) 会誌の投稿・編集状況
 - ・当会の会誌と投稿・編集状況について、藤井編集委員長から報告があった。
- 2) 当会のサーバーについて
 - ・担当の大八木英夫会員に代わり、知北運営委員長より報告があった。
- 3) JpGU2024 大会セッション「流域圏生態系における物質輸送と循環: 源流から沿岸海域まで」と「水循環・水環境」への共催参加
プログラム委員: 濱 侃会員, 知北和久会員
- 4) JpGU 学協会長会議 (2024 年 11 月 27 日開催) の報告
 - ・2026 年度は JpGU-AGU の共同開催のため、ほぼ全てのセッションで英語を使用
- 5) 会計報告
 - ・2023 年度、および 2024 年 11 月までの収支決算について、事務局・知北運営委員長より報告があり、これが了承された。
- 6) 会員状況
 - ・事務局・知北運営委員長より、2024 年 10～11 月に 12 名の入会 (一般 3 名, 学生 9 名) があり、現在の会員数 154 名であることが報告された。

III. 総会報告

2024 年 12 月 7 日 (土) に、出島メッセ長崎 109 室にて総会が開催された。

議題:

- 1) 次期会長について
- 2) 今年度の学会賞候補者について
- 3) 2025 年度の全国大会について
- 4) 要旨集と Waternews のデジタル化と J-Stage へのアップロード状況
- 5) 運営委員の退任について
- 6) その他

以上の議題 1)～6) について、事務局・知北運営委員長より運営委員会での審議内容が説明され、これが承認された。

報告：

- 1) 会誌の投稿・編集状況
- 2) 当会のサーバーについて
- 3) JpGU2024大会セッション「流域圏生態系における物質輸送と循環：源流から沿岸海域まで」と「水循環・水環境」への共催参加
- 4) JpGU学協会長会議（2024年11月27日開催）の報告
- 5) 会計報告
- 6) 会員状況

以上の報告事項1)～6)について、事務局・知北運営委員長より報告があり、承認された。

「陸水物理学会誌」投稿規程

陸水物理学会誌（英文名：Journal of the Japanese Society of Physical Hydrology）は陸水物理学会の機関誌で年1回から数回発行される。本誌には、広く陸水学に関する報文、その他を掲載する。本誌の発行は、学会のホームページ上に pdf ファイルの形で公開される。

1. 投稿者

第一著者あるいは責任著者は正会員に限る。ただし、編集委員会が依頼する原稿についてはその限りではない。

2. 投稿の種類

陸水およびその関連分野の報文（原著，総説，短報，報告）および書評とする。

(a)原著：独創性あるいは新規性のある研究論文で、価値ある結論あるいは事実を含む未発表のものとする。

(b)総説：その分野の研究の進捗状況，現状，展望などを総括した論文で、全体として一つのまとまった主張が展開されている未発表のものとする。

(c)短報：新しい事実や価値ある内容を含む論文，あるいは速報的価値のある内容やデータを含む論文で、未発表の比較的短いものとする。

(d)報告：陸水学に関する野外調査報告，講演記録，シンポジウム報告などの学術的な報告とする。

(e)書評：書籍などの書評。対象書籍等の著者が会員，または書評執筆者が会員とする。

3. 用語と制限ページ

投稿原稿で使用する言語は日本語と英語の両方とし，日本語の場合は英語のタイトルとアブストラクトをつける。図表中の言語は英語とし，本文で日本語を使用の時は図表の説明は英語と日本語の併記とする。

原著および総説の刷上りは 20 ページ程度以内，短報および報告は 10 ページ以内，報告は 5 ページ以内とする。カラーの図・写真は掲載可能で，これによる著者へ負担は生じない。書評の刷上りは 2 ページ以内とする。

4. 原稿の作成

学会ホームページから Microsoft Word ファイル形式の投稿用テンプレートと投稿票をダウンロードし，別に定める執筆要領に従い本文，図表，引用文献など作成する。また，必要事項を投稿票に記入する。

5. 原稿の投稿と受付

(a) 投稿方法

原稿および投稿票を電子メールに添付して編集委員長に送信する。

(b) 受付通知

受付の可否は、原稿が投稿用テンプレートの様式に従って作成されているかどうかの審査後、原則として1週間以内に、編集委員長から投稿者に通知される。期間を過ぎても受付通知が到着しない場合は、編集委員長に連絡すること。

6. 原稿の査読と受理または却下の通知

受け付けられた原著、総説、短報、報告の原稿は、複数の専門家による査読を受け、掲載の可否が判断される。査読の過程では原稿ごとに担当編集委員が置かれ、著者との連絡を行う。査読に要する期間は3週間程度以内である。査読の結果、修正を要すると判断された場合、担当編集委員はその内容を著者に伝え、修正を求める。修正原稿または査読結果への反論は、原則として3週間以内に再投稿しなければならない。修正原稿提出の際、著者は査読者からの修正意見毎に修正内容、修正箇所、反論などを明示した修正リストを提出すること。特別の理由なく1ヶ月を経過した場合は、その原稿は著者が取り下げたものと判断される。陸水物理学会誌への報文の掲載可否は、査読の最終結果を踏まえ、編集委員長が最終的に判断する。著者への受理または却下の通知は、編集委員長が行う。

7. 清書原稿の作成と校正

原稿が受理された場合、著者は編集委員会による英文校閲結果を含めて速やかに校正を行い、清書原稿を編集幹事に送付する。清書原稿における文章や図表の変更は、編集委員の指示によるもの以外は認められない。印刷原稿の著者校正は、原則として初校のみとし、再校以後は編集委員会が行う。

8. 掲載原稿の著作権

(a) 本誌に掲載された原稿の著作権は、陸水物理学会に帰属する。

(b) 陸水物理学会による著作権の行使は、電子化および電子ネットワーク上での公開を含む。

(c) 本誌に原稿を投稿する者は、著作権に関する条項を事前に承諾したものとみなされる。

9. 附則

本規程は、2020年4月1日より施行する。

「陸水物理学会誌」執筆要領

1. 文章の作成

陸水物理学会ホームページにある投稿用テンプレート（Microsoft Word ファイル）をダウンロードし、その様式に従って原稿を作成する。テンプレートにおいては、日本語摘要は1行48字でMS明朝10pt、英語摘要はTimes New Romanの10ptで作成のこと。本文は2段落1行21字で、日本語はMS明朝10.5pt、英語はTimes New Roman 10.5ptで作成のこと。原稿における式の使用はテンプレートでのWordファイルで「挿入」「数式エディタ」から行うこと。

2. 原稿の構成

(a) 投稿の種別

最初のページの1行目左に投稿の種別（原著論文・短報・報告・総説）を明記する。

(b) 原著論文・短報・報告・総説の種別に続けて、次の順序で記述する。①和文表題、②和文著者名、③英文表題、④英文著者名、⑤和文摘要、⑥英文摘要、⑦和文の所属と住所、⑧英文の所属と住所

ただし、⑦和文の所属と住所、および⑧英文の所属と住所はテンプレート1ページ目下の脚注に記載のこと

(c) 摘要とキーワード

和文摘要は300字以内、英文摘要は200語以内で、いずれも10ptを使用のこと。

キーワードは和文・英文とも5語以内で、いずれも10ptを使用のこと。

(d) 本文は「はじめに」と記して書き始める。原著論文と短報は、「方法（材料と方法、観測、調査など）」、「結果」「考察」（または、「結果と考察」「結果と討論）」「まとめ」（または「結論）」「謝辞」「参考文献」の順で記載し、各項目に番号付けを行う。各項目の中には必要に応じて小項目を置くことができる。小項目にも番号を付ける。総説の構成は「はじめに」以外の邪分は特に指定しないが、内容が理解されやすいように適宜項目や小項目を設定する。

3. 活字指定と表示法

テンプレートではMicrosoft Wordを使用しており、本文の日本語はMS明朝体の10.5pt、図表は全て英語表現とし、図表中の英数字はTimes New Roman体とする。図は鮮明な画像ファイル（拡張子jpg, gif, pngなどのファイル）を使用し、表は字体のサイズが変更できるオリジナルを挿入のこと。句読点は（。）および（,）とし、和文中は全角、英文中は半角とする。

図表の番号は、“**図 1.**”や“**Fig. 1.**”のように MS 明朝体と Times New Roman の**ボールド表示**で 10 pt とし、この後に続く図表の説明文は、普通字体で和文・英文共に 10 pt で書くこと。

図表を本文中で引用する場合、**Fig. 1, Figs. 2-4, Table 1** などと Times New Roman の**ボールド表示** 10.5 pt で記すこと。なお、**Fig.**、**Figs.**、**Table** と番号の間には半角空白を挿入のこと。写真は図として扱う。

4. 単位や日付などの表記

本文、図表ともに SI 単位を用いる。m s⁻¹、J kg⁻¹ K⁻¹ のような半角空白を挿入した指数表示とし、m/s、J/kg/K のような表現は使わない。数字や欧文表記は半角文字を使用する。日付の表示は西暦を用い、図表中やその英語説明文では mm/dd/yyyy や mm/dd の形式とする。

5. 引用文献の記載

(a) 本文中の引用

本文中の文献の引用は、引用順に[1]、[1-3]のように記して、最後の「参考文献」にこの順番で記載する。本文中で引用する場合は“奥田[4]によれば...”のような表記とする。著者が多い文献は、“中尾ほか[5]によれば....”のような表記とし、「参考文献」には著者全員の名を記載すること。

(b) 文献リストの作成

「文献」の項目には本文中に引用されたものすべてを記載する。記載順序は引用順とする。雑誌名は省略しないで表記し、英語の雑誌名はイタリック体にする。なお、DOI (Digital Object Identifier)が付与されている論文については、下記の「記入方法」に従い必ず記載すること。

記入方法

ア. 論文

和文の場合

「著者名 (年号) : 題目. 雑誌名, 巻 : ページ. DOI」の順に記載する。著者と著者の間は「・」でつなぐ。雑誌名と巻の間は半角空白にし、巻数は半角のボールド表示とする。数字と()は、Times New Roman を使用のこと。

例) 福富孝治・中尾欣四郎・三好日出夫・田上龍一 (1968): 登別温泉大湯沼の水収支および熱収支. 北海道大学地球物理学研究報告 **19**: 1-19. <https://doi.org/10.14943/gbhu.19.1>

藤井 智康・奥田 節夫 (1995): 中海・宍道湖における連系振動. 陸水学雑誌 **56**: 291-296. <https://doi.org/10.3739/rikusui.56.291>

英文の場合

「著者名(年号): タイトル. 雑誌名 (イタリック体), 巻 (ボールド表示): ページ.DOI」の順に記載する。著者が 2 名以上の場合は「,」でつなぐ。first name と middle name はイニシャルのみで「.」は省略する。

例) McMahon A, Moore RD (2017): Influence of turbidity and aeration on the albedo of mountain streams. *Hydrological Processes* **31**: 4477–4491. <https://doi.org/10.1002/hyp.11370>

Striegl, RG, Dornblaser, MM, Aiken, GR, Wickland, KP, Raymond, PA (2007): Carbon export and cycling by the Yukon, Tanana, and Porcupine Rivers, Alaska, 2001–2005. *Water Resources Research* **43**: W02411. <https://doi.org/10.1029/2006WR005201>

Fujii, T. (1997): Relationship of internal waves with tidal and wind drift effects and propagation of internal Kelvin waves in a brackish lake - Lake Nakaumi. *Japanese Journal of Limnology* **58**: 241-260. <https://doi.org/10.3739/rikusui.58.241>

イ. 単行本の場合

和文の場合

「著者名 (年号): 書名. 出版社, 発行地, 総ページ」の順に記載する。

例) 吉村信吉 (1937): 湖沼学. 三省堂, 東京, 520p.

英文の場合

「著者名 (年号): 書名. 出版社, 発行地, 国名, 総ページ」の順に記載する。

例) Dingman SL (2002): *Physical Hydrology*, 2nd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 646p.

ウ. 単行本の章または分冊

和文の場合

「著者名 (年号): 表題. 書名 (編著者), 引用ページ. 出版社, 発行地。」の順に記載する。

例) 奥田節夫 (1985): 土砂災害の危険範囲予測. 扇状地の土砂災害 (芦田和男編), 第 5 章, 155-191, 古今書院, 東京.

英文の場合

例) Mosley MP, McKercher AI (1993): Stremflow. In *Handbook of Hydrology*, Chapter 8, Maidment DR, ed., McGraw-Hill, New York, USA, pp. 8.1-8.39.

エ. WEB ページ

和文の場合

例) 気象庁 (2018): 日本活火山総覧 (第 4 版). URL: https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/menu_jma_hp.html (2019 年 1 月 8 日時点)

英文の場合

例) National Weather Service (2019): Snow depth. URL: https://www.weather.gov/nerfc/snow_depth_im (2019年1月7日時点)

「陸水物理学会誌」査読規程

1. 目的

この規程は、陸水物理学会誌の質を高め、陸水物理学および関連分野の一層の発展をはかるために定めるものである。

2. 論文の受付

論文の投稿があった場合、編集委員長は投稿論文の内容や原稿形式等を確認し、受付の可否を判断する。受付可と判断された場合には、担当編集委員を定めて論文の査読を依頼するとともに、投稿者に論文の受付日を連絡する。担当編集委員は査読者 2～3 名に論文の査読を依頼する。

3. 査読内容

査読者は、以下の基準 1) ～6) に基づいて査読し、客観的に掲載適否の判定を行うこととする。査読結果は別紙 1 の査読報告書にまとめて担当編集委員に送付する。査読に要する期間は概ね 3 週間とする。

- 1) 査読者は専門的見地から「論点及び事実の新規性」、「論拠の明示性」、「方法の再現性」、「考察の妥当性」、「全体を通した論理性」について意見及び判定案をまとめる。
- 2) 査読は内容の批判や討議を行うものではない。したがって見解の相違は掲載不適の理由とはならない。
- 3) 査読者は、著者に対して研究指導する立場にない。よって、投稿された原稿に対して、新たな調査や実験等の追加要求は極力避けなければならない。
- 4) 投稿された成果ができるだけ早く公表されるよう、査読者は査読期間を遵守しなければならない。
- 5) 査読者は査読により知り得た掲載前の原稿の内容を、いかなる形でも利用・剽窃・漏洩してはならない。
- 6) 個々の投稿原稿についての査読者名は原則として公表しない。また、著者との折衝はすべて編集委員会が行うこととし、査読者が著者と直接に折衝してはならない。

4. 査読結果の報告

担当編集委員は、査読者の査読報告書を参考として投稿論文の審査を行う。この審査で修正等が必要と判断された場合には、担当編集委員は投稿者に修正内容を連絡するとともに査読報告書を送付し修正原稿の提出を依頼する。修正原稿の提出のないまま特別の理由なく 1 ヶ月を経過した場合は、その原稿は著者が取り下げたものと判断される。

5. 再審査

担当編集委員は、投稿者から提出された修正原稿の再審査を行い修正が十分に行われて受理可能と判断された場合には、編集委員長にその審査結果を報告する。再審査の結果、査読者による再査読が必要と判断された場合には、査読者による再査読を行い、その結果を投稿者に連絡する。

6. 論文の受理

編集委員長は、担当編集委員から提出された審査報告書を基に担当編集委員と協議して論文の受理を決定する。論文が受理された場合には、編集委員長は投稿者に受理通知を送付する。論文が受理できない場合には、その理由を投稿者に連絡する。

7. 最終原稿の提出

投稿者は論文が受理された後、編集委員長に受理論文の最終原稿を電子ファイルで提出する。なお、編集委員長は最終原稿について、原稿の訂正を投稿者に求めることがある。

8. 印刷原稿の校正

オンライン版原稿の訂正を行う場合、印刷上の誤り以外の字句の訂正、挿入、削除は原則として認めない。

9. 査読規程の制定及び変更

この規程の制定及び変更は運営委員会の決議を経て行うものとする。

2019年3月1日制定

別紙1 (査読報告書様式)

年 月 日

査読報告書 (査読者 A 第1 審)

受付番号 : XXXX (原稿番号)

投稿分類 : 原著

総説

短報

報告

書評

表 題 :

著 者 :

査読者 :

判定結果 : このまま掲載してもよい

指摘箇所を編集委員会で修正し掲載してよい

著者に戻して修正させ、編集委員会で確認し掲載してよい

著者に戻して修正させ、再度査読する必要がある

掲載は不適當である

編集委員会への意見 (著者に対しては開示されません)

著者へのコメント :

1) 全体的意見

2) 個別的意見 (ページ・行, 指摘事項)

編集後記

陸水物理学会誌第6巻をお届けします(表紙は2024年度陸水物理学会長崎大会(第45回)巡検「島原半島ジオパーク等(雲仙市・島原市・南島原市)」における雲仙地獄の写真である)。会員の皆様の熱心な論文のご投稿, 編集作業へのご協力により, 今巻も1編の論文を掲載することが出来ました。ここに, 会員の皆さまに感謝申し上げます。

陸水物理研究会が発足して以来, 45年が経ちますが, 2019年度に陸水物理学会と改称して早5年が経とうとしています。本学会のさらなる発展と世間にインパクト与え, また個性ある学会誌をつくって行くために会員の皆様のご協力を今後ともどうぞよろしくお願い致します。また, 本学会誌に積極的なご投稿をお待ちしております。

(編集委員長 藤井智康)

陸水物理学会

事務局 会長 鈴木 啓助 (信州大学)
運営委員長 知北 和久 (北海道大学)

編集委員会 委員長 藤井 智康 (奈良教育大学)
委員 大八木 英夫 (南山大学)
委員 柴田 智郎 (福岡大学)
委員 谷口 智雅 (三重大学)
委員 山田 誠 (龍谷大学)

陸水物理学会誌 第6巻 第1号

2024年12月25日発行

発行 陸水物理学会
〒001-0021 札幌市北区北21条西11丁目
北海道大学北極域研究センター知北和久気付
電話・FAX TEL: 011-706-9074(代) FAX: 011-706-9623
E-mail chikita@sci.hokudai.ac.jp
URL http://jsph.sub.jp

※本冊子内容の無断の複製・転載を禁ず

Journal of the Japanese Society of Physical Hydrology

Vol. 6, No. 1

December, 2024

Contents

Foreword	Ryuji IKEDA	...	1
Original Paper			
Coloration mechanism of Ao-ike Pond, Aomori Prefecture, based on image analyses of RAW files	Ryuji HANAISHI and Kazuhisa CHIKITA	...	3
Announcements			29
Instructions for Authors			31
Submission Guidelines			33
Peer Review Regulations			37
Editor's Postscript			41

Published by

The Japanese Society of Physical Hydrology

Hokkaido University Arctic Research Center

Kita-21 Nishi-11 Kita-ku, Sapporo 001-0021, Japan

<http://jsph.sub.jp/>