

陸水物理学会誌

Journal of the Japanese Society of Physical Hydrology

第1巻 第1号

2019年12月



陸水物理学会

The Japanese Society of Physical Hydrology

陸水物理学会誌

第 1 卷 第 1 号 2019 年 12 月

目 次

巻頭言	鈴木啓助 ...	1
論 文		
青森県・青池の呈色に関する研究：画像解析とモデリング	花石竜治, 大坂直人, 知北和久 ...	3
会務報告		25
投稿規定		27
執筆要領		29
編集後記		32

巻頭言 (Foreword)

山岳地域における陸水研究の重要性

鈴木啓助¹

陸水の源は、蒸発散によって大気中に放出された水蒸気が、雲の中で降水粒子として成長し、落下速度を得る大きさになり降水となったものである。これは、地球上の水の大半を占める海水から地球上の至る所の地表面に、陸上の生物に不可欠な淡水を供給する優れた装置である。降水として地表面にもたらされた水は、樹木に一時的に貯留されすぐさま蒸発したり、土壌に浸透し樹根から吸収され葉から蒸散によって大気中に戻ったり、地下に浸透してから湧水・河川水となったりと様々な経路により再び海に戻る。標高の高い場所に水を運び上げる駆動力は、蒸発から氷晶形成に至る降水粒子形成過程である。標高の高い場所への降水は、様々な流下の道筋を経て海に戻るまで多くの生物に恩恵を与えることになる。つまり、山岳にもたらされた降水は陸水となり、多様な側面から水としてのポテンシャルが相対的に高いと言える。さらに、人間生活にとっても、山岳地域で涵養された陸水は水資源として極めて重要である。しかしながら、日本は島国であり大陸と比較して河川の流路延長が短く、流路勾配も急であるため、河川水の流速が早く滞留時間が短い。そのため、水を効率的に利用するために、標高の高い場所に多くのダムが造られている。人為的に造られたダムは、水のみならず土砂や栄養塩の下流への流下を阻止するため、砂浜の減少や沿岸生態系への影響などの弊害も懸念されている。降水が液体降水である雨の場合は、地表面に落下するとすぐに重力により浸透や流下を開始するが、固体降水としての雪の場合には、時間の長短はあっても一定期間はそのまま地表面に堆積することになる。積雪となってから短時間で融解してしまうこともあるが、山岳地域では低温環境にあるために比較的長い期間にわたって積雪として溜まることになる。中部山岳地域の3000m級の稜線を有する流域では、11月頃から積雪が始まり5月頃に融雪の最盛期

を迎え、7月ないし8月頃まで融雪出水が続く。わが国での田植えが、まだ気温が低い梅雨前に行われるようになった背景には、品種改良とともに稲作地域の多くが雪国であることも関わっている。梅雨に入る前は降水量が少ないが、山からの豊富な雪解け水が田植えに必要な用水を支えている。このことから、山岳地域の積雪は「天然の白いダム」とも呼ばれているのである。このように、山岳地域における降水から流出に至る陸面上での水循環過程は、わが国の水資源や水利用の側面からも極めて重要である。しかしながら、山岳地域の陸水について、降水から流出までの水循環過程の定量的な研究が十分になされているとは言い難い。特に、雪の状態を経る陸水研究は特に不十分である。陸水の物理現象を研究するためには、現地での観測調査が不可欠であるが、冬期の山岳地域は自然環境が厳しく、そこでの観測に耐えうる機器の問題もある。今後の気候変動下での山岳地域における陸水の応答については、学会員の英知を結集し解明されることを期待したい。



大町市立山岳博物館から望む初夏の鹿島槍ヶ岳(右)と爺ヶ岳(左)

¹ 陸水物理学会会長、信州大学名誉教授、大町市立山岳博物館館長

原著 (Research Article)

青森県・青池の呈色に関する研究：画像解析とモデリング

花石竜治¹・大坂直人²・知北和久³

A study on the coloration of Aoike Pond, Aomori Prefecture:

Image analyses and modeling

Ryuji HANAISHI¹, Naoto OSAKA² and Kazuhisa CHIKITA³

摘要 青森県・十二湖の一つ青池の青色呈色について、画像解析とモデル計算を行った。モデリングでは、池の青色呈色は、湖底乱反射前後の水による光吸収と波長依存性を持つ湖内光散乱前後の水による光吸収、という2つの要因で生じると考えた。画像解析結果とモデル計算結果との比較から、湖底乱反射および水の密度変動散乱（分子散乱）が呈色に寄与していることがわかった。湖面の色調については、前者の呈色は緑色を帯びた青色で、後者は濃い青色であり、それらの寄与を分離できた。「青池カラーチャート」を含めたモデル計算により、青池の最大水深（8.8 m）はこれら二者が同オーダーの大ききで寄与する条件であることが明らかになった。

キーワード 青池、乱反射、密度変動散乱、青色呈色、青池カラーチャート

Abstract Image analyses and modeling were carried out on blue coloration of Aoike Pond, Aomori Prefecture. In a theoretical model, it is assumed that the blue coloration occurs by light absorption of water before and after irregular reflection at lake bottom and by light absorption of water before and after light scattering with the dependence on wavelength. A comparison between analytical results of images and simulated results by the model revealed that both the irregular reflection at bottom and the water-density fluctuation scattering (or molecular scattering) contribute to the blue coloration. The optimization of parameters in the model allowed us to separate the two contributions where the irregular reflection and the density fluctuation scattering produce greenish colors with blue and deep blue colors, respectively. In the simulation including “Aoike color chart”, the maximum depth of Aoike Pond at 8.8 m proved to be responsible for the existences of the irregular reflection and density fluctuation scattering with the magnitude of same order for contributions to blue coloration.

Keywords Aoike Pond, Irregular Reflection, Density Fluctuation Scattering, Blue Coloration, Aoike Color Chart.

1. はじめに

湖沼の呈色は、陸水物理分野で関心が持たれてきた話題である。海洋については、古く Jerlov の海洋光学の教科書 [1] で光散乱および色調計算の等色関数法が論じられ、また水圏の光合成についての Kirk の物理学アプローチ [2] では、可視領域に光吸収を持つ物質群が分類され、水圏の光学的特徴が論じられた。

水圏の光挙動は吸収と散乱に分類される。この要素のうち、水そのものの光吸収および光散乱は基本的な

ものである。Jerlov [1] および Kirk [2] が記述しているように、水分子そのものの光散乱は、Einstein-Smoluchowski の理論により“密度変動散乱 (water-density fluctuation scattering)” (水の密度のゆらぎに起因する散乱、単に“分子散乱”ともいう) とされ、気相におけるレイリー散乱と同様に、波長の4乗分の1に依存する強度を示すとされる。

これらの水の性質だけが水圏の呈色に現れる例として、アメリカ合衆国オレゴン州の Crater 湖が知られる。この湖について、Smith ほか [3] は、分光上向きおよび

*1 青森県環境保健センター 〒030-8566 青森市東造道一丁目 1-1 Aomori Prefectural Public Health and Environment Center, Aomori, 030-8566

*2 青森県原子力センター 〒039-3215 青森県上北郡六ヶ所村倉内字笹崎 400-1 Aomori Prefectural Nuclear Power Safety Center, Aomori, 039-3215

*3 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

び下向き放射強度を観測し、また Smith ほか [4] は、分光上向き放射強度を用いて等色関数法によって色度図上へ色度をプロットした。

一方、Morel ほか [5] は、波長 380 nm~700 nm の入射光を用いた純水の測定から、その密度変動散乱係数を実験的に求め、これが波長の 4.3 乗分の 1 に比例することを実証した。ここで、波長の 4 乗分の 1 からの乖離は、Kirk [2] によれば、水の波長依存の屈折率に起因するとされる。

そして Davies-Colley ほか [6] は、Morel ほか [5] の研究に言及し、水圏の水が光学的に純水に近い場合は、水の分子散乱 (密度変動散乱) の効果が現れ、Crater 湖の青色呈色はその散乱によるものと総括した。

Crater 湖は平均水深 300 m 以上の深い湖沼であるが、他方、Jerlov [1] は、浅い湖底における光反射の寄与が無視できない場合もありうることを指摘している。よって、水以外の呈色要因の寄与が小さくかつ比較的、浅い湖沼においては、湖底における反射と密度変動散乱の双方が重ね合わせで寄与し、湖底における白色的反射光および波長依存の強度を持つ散乱光が、その光路の長さに応じて水による光吸収の因子を含み、色調を現して呈色の要因となる可能性を示唆する。これまで、水底からの反射を水圏における単色光の上向き放射強度に対して考察した例 [1] はあったが、水圏の呈色に含めて検討した例はなかったと考えられる。

2. 研究対象

本研究で呈色モデルの対象となる十二湖の一つ青池 (Fig. 1) は、青森県西津軽郡深浦町にあり、津軽国定公園の一部である。三上ほか [7] および高貝ほか [8] によると、最大水深 8.8 m、透明度全透、湖岸外周 125 m である。その青色呈色の機構は、深浦町役場のウェブサイト [9] では不明とされているが、高松ほか [10] は、青池の青色呈色は、水による光吸収を基調とし、定性的にはあるが、ケイ酸塩鉱物微粒子によるレイリー散乱が関与していると結論している。

青池の水文的特徴は、吉村ほか [11] によれば、一連の越口ノ池 (こしぐちのいけ; Fig. 1) 湖群の地下水源泉であり、沢や流入河川はなく、湖水はほとんど湧水

由来とされている。

青池は湖岸から観察すると無風時に湖面上にさざ波が生じるほどの大きな湧水流入があり、また伏流して湧出すると推定される鶏頭場ノ池 (けとばのいけ; Fig. 1) の湖面が波立つほどの湧出量を持つ。青池の湖水は、吉村 [12] によれば、夏期でも全層で 10 °C 以下でほぼ一定である。これらのことから、花石ほか [13] が推定しているように、湖水の滞留時間が極めて短いと考えられる。

青池湖水の化学分析手法による先行研究については花石ほかの既報 [13] において言及しているため、ここでは詳述を避けるが、しばしば水圏において緑色呈色の原因と考えられるクロロフィルは極めて濃度が低いとされる (工藤ほか [14])。それ以外に可視領域に吸光度を持つ呈色物質は、水そのもの以外に報告された例はない。花石ほか [15] は、青池湖内において湖水の可視領域の光吸収スペクトルを測定し、その結果から、青池湖水の可視領域の光吸収は純水と同じという結果を得ている。それ以外の呈色に寄与する因子は、高松ほか [10] が指摘したレイリー散乱をもたらずと考えられるケイ酸塩鉱物微粒子以外には、現在のところ、存在しないと考えられる。

上記の見地から、花石ほか [13] は、青池の呈色因子を水そのものの光吸収に求め、晴れて日射の強い場合に湖底が観測できる点に着目し、湖底における乱反射の効果を水の光吸収と組合せたシミュレーションを行った。そこでは、可能性がある光散乱を白色的と仮定し、実測の画像の解析から、寄与しているのは湖底乱反射が支配的だと結論した。

本研究においては、花石ほか [13] によるシミュレーション研究における論考をさらに進め、従来の湖底乱反射を基軸とするが、湖内光散乱において、これまで取り上げてきた白色的光散乱であるミー散乱のほかに、波長の 4 乗分の 1 に強度が比例する密度変動散乱 (分子散乱、または同じ波長依存性を示す“レイリー散乱”) も考慮した。これにより、より精度が高い物理モデル・パラメータを得て、青色呈色のシミュレーションを改善し、検討したので報告する。

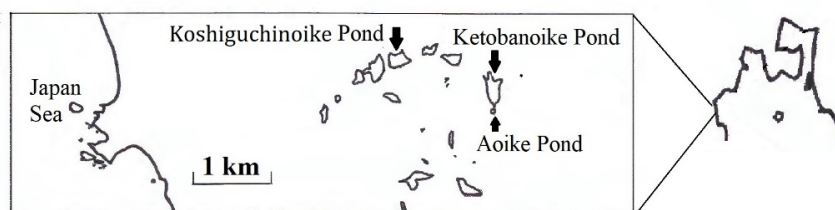


図 1. 青森県・青池と関連湖沼の位置図。

Fig. 1. Location map of Aoiike Pond and associated ponds in Aomori Prefecture.

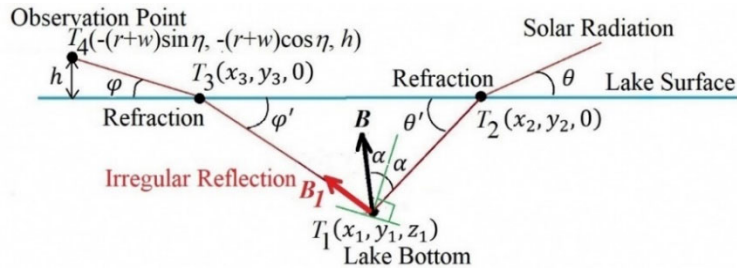


図 2. 湖底乱反射の場合の光路図.

Fig. 2. Optical path diagram in the case of irregular reflection at the lake bottom.

3. 呈色に対する理論モデル

ここでは、青池の呈色をもたらす要因を項目ごとに説明し、理論モデルを構築する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{g^2} + \frac{y^2}{g^2} - (z + d) &= 0 \\ g &= \frac{r}{\sqrt{d}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3.1. 直達日射の場合

(1) 湖底乱反射光

青池湖底が明るい色を呈することが晴天時に展望台上から観察され、地質図 (青森県 [16]) から、その湖底が灰白色の「十二湖凝灰岩」からなると推定され、それゆえ高い反射率を有すると考えられた。以下、湖底での乱反射を考慮する際の要点を述べる。

湖面に入射した太陽光が湖底で白色的に乱反射され、乱反射光が湖面で射出し、観測点に届くとする。湖面入射から射出までの湖内光路長での水の光吸収のため、観測光の色調が決まると考える。

観測される光強度については、湖底における面積素片を考え、湖面における入射・射出の際のフレネルの反射透過係数 (鶴田 [17])、乱反射の強度比をベクトルの正射影の因子によるとする。さらに、湖面に投影された湖底の面積素片の大きさで湖面からの微小面積からの寄与で観測する立体角をなすと考える。光散乱による光路長に対する指数関数的減衰因子も考慮する。光強度の式に入る湖底における面積素片について、湖底全体にわたって積分し、湖面の眺望での湖面上の不均一な色調・明暗を表現する。

湖底については、青池の湖盆形態を漏斗型とした吉村ほか [11] を参照し、数学的に扱いやすい微分可能な回転放物面として近似する。

Fig. 2 に湖底乱反射の場合の光路図を示した。以下に、上述の考えを具体的に記述する。

(a) 湖底点座標と面積素片

回転放物面の表面は(1)式で表される。Fig. 3 に回転放物面状の湖盆モデルを図示した。

湖底点である回転放物面の表面の直交座標 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ を媒介変数表示する。

$$\begin{aligned} x_1 &= r t \cos \psi \\ y_1 &= r t \sin \psi \\ z_1 &= d(t^2 - 1) \end{aligned}$$

ここで、 $0 \leq \psi < 2\pi$, $0 \leq t \leq 1$ である。

湖底の面積素片 ΔS は、Jacobian および二重積分の面積分への変換を求めると

$$\Delta S = \sqrt{r^2 + 4d^2 t^2} r t \Delta \psi \Delta t \quad (2)$$

と表される。

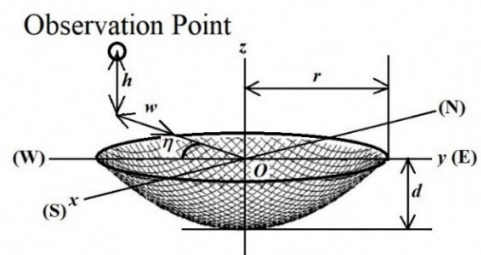


図 3. 回転放物面状湖盆モデル.

Fig. 3. Paraboloid basin model.

(b) 太陽光入射ベクトルの決定

日時から赤坂の方法 [18] により太陽高度および方位角を求め、これから太陽光入射ベクトルを求める。

太陽光が湖面に入射する方向の単位ベクトルを A' とすると、これは太陽高度 θ , 方位角 ϕ を用いて次

のように表せる。ここで方位角 ϕ は、天頂から見て、北 (0) → 東 → 南 (π) → 西 → 北の向きに取る。

$$\mathbf{A}' = (\cos\theta\cos\phi, -\cos\theta\sin\phi, -\sin\theta)$$

(c) 湖面上入射点の決定

大気に対する水の相対屈折率を n_{12} とすると、長谷川の式 [19] により、湖内入射後の方向ベクトル \mathbf{A}'' は次式で表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{A}'' &= \left(\frac{\cos\theta\cos\phi}{n_{12}}, -\frac{\cos\theta\sin\phi}{n_{12}}, -\sqrt{1 - \frac{1}{n_{12}^2}\cos^2\theta} \right) \quad (3) \\ &:= (A''_x, A''_y, A''_z) \end{aligned}$$

これにより湖面入射点座標 $T_2(x_2, y_2, 0)$ について次式を得る。

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 - \frac{z_1}{A''_z} A''_x \\ y_2 &= y_1 - \frac{z_1}{A''_z} A''_y \end{aligned}$$

(d) 乱反射光ベクトルおよび湖面射出点の決定

乱反射光の方向ベクトル $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ は湖底点座標 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ と観測点座標 $T_4(x_4, y_4, z_4)$ が決まれば一意に決まるので、これを求める四次方程式 [13] を導く。

中間点となる湖面射出点の座標を $T_3(x_3, y_3, 0)$ として

$$\frac{x_3 - x_1}{b_{1x}} = \frac{y_3 - y_1}{b_{1y}} = \frac{-z_1}{b_{1z}} \quad (4)$$

$$\frac{x_4 - x_3}{n_{12}b_{1x}} = \frac{y_4 - y_3}{n_{12}b_{1y}} = \frac{z_4}{n_{12}\sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2}} \quad (5)$$

これらとベクトル \mathbf{B}_1 の規格化条件から、

$$X = \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2}$$

とすると、解くべき代数方程式は X^2 についての四次となり、(6)式で表される。これを数値的に解き、得られた正の解から正の b_{1z} を求め、(4)(5)式から導かれる次式から乱反射光ベクトル成分を得る。

$$\begin{aligned} b_{1x} &= \frac{x_1 - x_4}{-\frac{z_4}{X} + \frac{z_1}{b_{1z}}} \\ b_{1y} &= \frac{y_1 - y_4}{-\frac{z_4}{X} + \frac{z_1}{b_{1z}}} \end{aligned}$$

同時に乱反射光の湖面射出点座標 $T_3(x_3, y_3, 0)$ も求める。

$$\begin{aligned} x_3 &= x_1 - \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1x} \\ y_3 &= y_1 - \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1y} \end{aligned}$$

観測点座標 $T_4(x_4, y_4, z_4)$ については、Fig. 3 に示したように、湖岸から観測点までの水平距離を w 、観測点の高さを h 、観測点位置の真西からの偏角を η として、次式のとおりとする。

$$\begin{aligned} x_4 &= -(r + w)\sin\eta \\ y_4 &= -(r + w)\cos\eta \\ z_4 &= h \end{aligned}$$

(e) 光路を制限する因子

寄与する光路に次の3条件を課して制限を設ける。

- ① 湖底での反射で、観測点から見て逆方向の反射がないこと。

$$\begin{aligned} &\left[\left(X^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) \left\{ X^2(z_1^2 + z_4^2) + \left(1 - \frac{1}{n_{12}^2} \right) z_4^2 \right\} + X^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + X^2 + 1 \right) \{ (x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 \} \right]^2 \\ &- 4X^2 \left(X^2 - \frac{1}{n_{12}^2} \right)^2 \left(-\frac{1}{n_{12}^2} + X^2 + 1 \right) z_1^2 z_4^2 = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

この条件は, \mathbf{A} を入射光ベクトル ($\mathbf{A} = -\mathbf{A}''$), \mathbf{B}_1 を乱反射光ベクトルとし, これらのなす角を γ とすると, $\gamma < \pi/2$ であることから,

$$\cos\gamma = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}_1 > 0$$

となる。

② 滑らかな湖底を仮定したときの法線ベクトルと乱反射光ベクトルのなす角が $\pi/2$ 未満であること。

法線ベクトル \mathbf{n}_0 は, 湖底点を $T_1(x_1, y_1, z_1)$ としたとき, 回転放物面の表面を表す(1)式の偏微分から次式で表される \mathbf{n}' を規格化した単位ベクトルである。

$$\mathbf{n}' = (-2x_1, -2y_1, g^2)$$

制限条件は, 法線ベクトルと乱反射光ベクトルのなす角を κ とすると,

$$\cos\kappa = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{B}_1 > 0$$

となる。

③ 崖による光路制限。

青池周囲は急峻な崖に覆われており, 低高度の太陽光入射が制限される状況にある。

よって, 数値計算上の仮定として, 高さ ξ , 傾斜角 δ の崖が湖岸を囲むとする。Fig. 4 に様相を示す。湖面入射点 $T_2(x_2, y_2, 0)$ への入射光線の, 崖の高さ ξ における水平面の交点を $T_0(x_0, y_0, \xi)$ とする。入射光の方向ベクトル

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' &= (\cos\theta\cos\phi, -\cos\theta\sin\phi, -\sin\theta) \\ &:= (A'_x, A'_y, A'_z) \end{aligned}$$

から, 直線の方程式を解くと

$$\begin{aligned} x_0 &= x_2 + \frac{\xi}{A'_z} A'_x \\ y_0 &= y_2 + \frac{\xi}{A'_z} A'_y \end{aligned}$$

崖の周囲内に T_0 が位置する条件は,

$$\sqrt{x_0^2 + y_0^2} < r + \frac{\xi}{\tan\delta}$$

である。

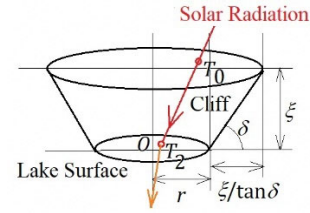


図4. 崖による光路制限条件の図示。

Fig. 4. Schematic diagram for limitation of the optical path by the cliff.

(f) 光強度に乗ぜられる因子

この因子として以下の (ア) から (オ) を挙げる。

Fig. 5 に, 湖底における乱反射を考える場合の面積素片の概念図を示した。

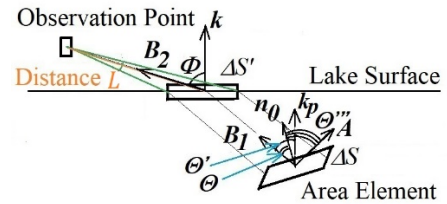


図5. 湖底における乱反射を考える場合の面積素片の概念図。

Fig. 5. Conceptual diagram of an area element accompanied by irregular reflection at lake bottom.

(ア) 滑らかな湖底を仮定した場合の反射光ベクトル \mathbf{B} に対する乱反射光ベクトル \mathbf{B}_1 の正射影による強度因子

Fig. 6 に様相を示す。ベクトル \mathbf{A} と \mathbf{n}_0 のなす角を α とすると, 内積を用いて,

$$\cos\alpha = \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_0$$

反射の法則により, \mathbf{n}_0 を用いて \mathbf{n}'' を次式で表せる。

$$\mathbf{n}'' = (2\cos\alpha)\mathbf{n}_0$$

また,

$$\mathbf{n}'' = \mathbf{A} + \mathbf{B}$$

から次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{n}'' - \mathbf{A} \\ &= 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_0)\mathbf{n}_0 - \mathbf{A} \end{aligned}$$

上記により求めた反射光ベクトル B および乱反射光ベクトル B_1 のなす角の余弦がこれらのベクトルの内積であり、それはベクトル B_1 のベクトル B への正射影である。求める強度に関する乗算因子 T は

$$T = B_1 \cdot B$$

である。

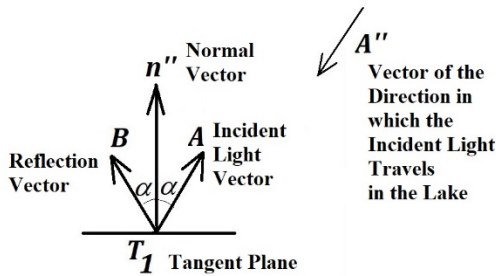


図6. 湖底での反射に関するベクトル図。

Fig. 6. Vector diagram of reflection at lake bottom.

(イ) 入射光の傾度の強度因子

湖底の面積素片へ入射光が入射する場合の傾度の効果は、湖面の単位法線ベクトル n_0 と入射光ベクトル A のなす角 θ''' の余弦がこれらのベクトルの内積であり、強度に関する乗算因子になる。この強度因子は、

$$\cos\theta''' = n_0 \cdot A$$

である。

(ウ) 湖面への光束の射出における立体角の効果

湖面射出点と観測点との距離 L 、観測点から見た湖面射出点における面積素片 $\Delta S'$ への立体角 $\Delta\omega$ 、観測点から鉛直下方へのベクトルと観測点から湖面射出点へのベクトルのなす角 ϕ とすると次が成り立つ [20]。

$$\Delta\omega = \frac{\Delta S' \cos\phi}{L^2}$$

ここで、

$$\cos\phi = B_2 \cdot k$$

$$B_2 = \left(n_{12}b_{1x}, n_{12}b_{1y}, n_{12} \sqrt{\frac{1}{n_{12}^2} - 1 + b_{1z}^2} \right)$$

$$L = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + z_4^2}$$

である。

湖面上において次式を立体角 Ω とする。

$$\Omega = \sum \frac{\Delta S_{unit} \cdot \cos\phi}{L^2}$$

ここで、 $\Delta S_{unit} = 1 \text{ m}^2$ であり、メッシュを切った湖面上の単位面積区間で和を取る。

これから次式で定義される無次元の $\Delta\Omega$ により、湖面上へ射影された面積素片の照度への寄与が決定されると考える。

$$\begin{aligned} \Delta\Omega &= \frac{\Delta\omega}{\Omega} \\ &= \frac{\Delta S' \cos\phi}{L^2 \Omega} \end{aligned}$$

湖面上における面積素片の射影 $\Delta S'$ は、湖底における面積素片 ΔS の傾度を考慮したものとなる。いま鉛直方向単位ベクトル k を、乱反射光ベクトル B_1 および法線ベクトル n_0 の共平面上に射影した方向の単位ベクトル k_p を考えると、これらのベクトルのなす角で $\Delta S'$ が決まることが予想される。

具体的には、 k_p は、ベクトルの外積から得た単位ベクトル $B_1 \times n_0 / |B_1 \times n_0|$ と k との内積を長さとするベクトルと k との差ベクトルを規格化したベクトルである。面積素片の射影を考える際に、これらのベクトルのなす角の大小で場合分けが生じることも想定される。

面積素片が湖面へ射影される場合、その射影された面積素片の大きさが変わり、射影に伴う立体角への乗算因子が立体角の大きさについての”比例係数”となる。一方、この比例関係で立体角が変化すると、この”比例係数”で、それに反比例して湖面の単位面積区間の光エネルギーが変化する。

すなわち射影による立体角の効果は、エネルギーの保存の見地から相殺され、寄与しないことになる。なお、この効果を考慮する必要がないことは、湖面上を走査する計算法ではなく湖底を走査する方法を採用した場合の利点と考えられる。

以上から立体角の因子は

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S \cos\phi}{L^2 \Omega}$$

となる。

(エ) 湖底の傾きが乱反射光強度に与える影響

湖底の面積素片の傾きが乱反射光強度に与える影響は、前々項(イ)の効果のほかに、射影される面積素片が湖面上にあることから、

$$\cos\theta = \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{n}_0$$

が強度に関する乗算因子である [20]。

(オ) フレネルの反射透過係数 [17]

偏光がない場合、光のエネルギーについてのフレネルの反射透過係数 D は、界面の法線に対する入射角を χ 、射出角を χ' とした場合、

$$D\left(\frac{\pi}{2} - \chi, \frac{\pi}{2} - \chi'\right) := \frac{1}{2}(T_P + T_S)$$

$$T_P := \frac{\sin 2\chi \sin 2\chi'}{\sin^2(\chi + \chi') \cos^2(\chi - \chi')}$$

$$T_S := \frac{\sin 2\chi \sin 2\chi'}{\sin^2(\chi + \chi')}$$

である。

(カ) (ア) から (オ) の因子の総合

以上、考察した強度に関する強度因子および立体角因子を乗算し、 ρ を白色的な湖底の反射率とすれば、光強度式が含む次式の因子を得る。ここで

$\theta, \theta', \varphi, \varphi'$ は Fig. 2 に示している。

$$\Delta Q_R = \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta'''}{L^2} T \cdot D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{\rho}{\Omega}$$

(g) 光路長の計算

乱反射点 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ で乱反射した光の光路長は、線分 T_2T_1 の長さを L_1 および線分 T_1T_3 の長さを L_2 とすると、次式で表される。

$$P_R(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1) = \beta_{fine} K_m f(\lambda_i) T \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\phi \cdot \cos\theta'''}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{\rho}{\Omega} \cdot \exp[-(L_1 + L_2)\{k + A(\lambda_i)\}] \quad (8)$$

$$L_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_1^2} = \frac{z_1}{A''_Z}$$

$$L_2 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + z_1^2} = -\frac{z_1}{b_{1z}}$$

(h) 光吸収と散乱による減衰を考慮する乗算因子

波長 λ_i における光吸収と、散乱による白色的光減衰寄与を与える式は、 $A(\lambda_i)$ を波長 λ_i における水の吸収係数 [21]、 k を光散乱強度因子として、

$$\exp[-(L_1 + L_2)\{k + A(\lambda_i)\}]$$

となる。

(i) 太陽光照度の呈色計算への取り込み

太陽光の分光放射強度 $f(\lambda_i)$ (花石ほか [15]) および等色関数 $\bar{y}(\lambda_i)$ (無次元) から、照度計算値 $E_{0,fine}$ を(7)式について求め、これと照度設定値 E から得た β_{fine} とする。

$$\left. \begin{aligned} E_{0,fine} &= \sum_{\lambda_i} K_m f(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ \beta_{fine} &= \beta_0 \frac{E}{E_{0,fine}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上記で β_0 はスケールングファクタを含む因子となり、画像解析で決定する。

(j) 入射する太陽光分光放射強度と反射光強度

直達日射の場合、波長 λ_i における太陽光の分光放射強度 $f(\lambda_i)$ および放射強度から測光量への変換係数 $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ により、次元が [照度]¹ であるスケールングファクタ β_{fine} から、湖底反射の光強度について、太陽高度・方位角および湖底における面積素片を指定する媒介変数に依存するとし、(8)式の $P_R(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1)$ として表す。

$$\left. \begin{aligned} R_R(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} R(\theta, \phi, \psi_1, t_1) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2}{2\sigma^2}\right] \\ G_R(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} G(\theta, \phi, \psi_1, t_1) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2}{2\sigma^2}\right] \\ B_R(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} B(\theta, \phi, \psi_1, t_1) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)\}^2}{2\sigma^2}\right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(k) 等色関数との積の波長積分および RGB 値への線形変換

(8)式で表された光強度を等色関数との積の波長積分を行い、三刺激値 X, Y, Z を算出し、大田[20] に記載の線形変換により R, G, B 値 (以下, “RGB 値” と表記) を算出する。三刺激値 X, Y, Z および RGB 値は、次から計算する。

$$\begin{aligned} X &= \sum_{\lambda_i} P_R(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ Y &= \sum_{\lambda_i} P_R(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ Z &= \sum_{\lambda_i} P_R(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

ここで,

$$\begin{aligned} R(\theta, \phi, \psi_1, t_1) &:= R \\ G(\theta, \phi, \psi_1, t_1) &:= G \\ B(\theta, \phi, \psi_1, t_1) &:= B \end{aligned}$$

(l) 離散的な射出点からの湖面上の二次元正規分布の考慮

湖面上の射出点座標は今、湖底点を離散的に取っているため離散的な値であり、湖底点に依存することから、媒介変数 ψ_1, t_1 の関数であることを明示して、 $x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)$ および $y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1)$ と記述する。このとき、湖面上の座標 (x, y) において、 T_3 を中心として光が分散 σ^2 で二次元正規分布し、考える光路の湖面における光強度が重ね合わせで寄与するとすれば、湖面上の点 (x, y) における RGB 値である $R_R(\theta, \phi, x, y)$, $G_R(\theta, \phi, x, y)$ および $B_R(\theta, \phi, x, y)$

は、(9)式のように表せる。

(m) 湖面平均照度の算出

(9)式で示された RGB 値は [長さ]²=[面積]⁻¹ の次元を持つので、湖面上の単位面積区間で和を取り無次元とし、さらに次式で、輝度 (三刺激値の Y 値) の計算を行い、スケーリングファクタ β_0 で除して、(10)式の湖面平均照度 (相対値) を得る。

$$\begin{aligned} \text{照度(相対値)} &= \frac{1}{\beta_0} \left\{ 0.2126 \sum_{x,y} R(\theta, \phi, x, y) \right. \\ &\quad + 0.7152 \sum_{x,y} G(\theta, \phi, x, y) \\ &\quad \left. + 0.0722 \sum_{x,y} B(\theta, \phi, x, y) \right\} \quad (10) \end{aligned}$$

(n) RGB 値から sRGB 値への変換

日本工業標準調査会・審議 [22] にしたがって、光強度に比例する (線形) RGB 値から、ディスプレイ表示および印刷のため補正した sRGB 値を計算し、255 を乗じて整数値とし、電算で扱う 8 ビット長符号なし整数値の RGB 値とする。

(2) 湖内散乱光

湖内散乱として、波長の 4 乗分の 1 に散乱光強度が比例する密度変動散乱 (レイリー散乱も同一の波長依存性を持ち、解析では区別できないので、密度変動散乱として扱う) および白色的光散乱であるミー散乱の二つを考慮する [1, 2]。

(a) 散乱に関する体積素片

湖底における乱反射と同様の湖底走査による計算の基礎を構築するため、湖底乱反射の場合に考察した湖底の面積素片と同じ面積素片を考え、その水平面への射影と鉛直方向の増分を考慮し、体積素片を導入する。**Fig. 7** に、湖内における光散乱を考える際の面積素片の概念図を示した。以下に考え方を示す。

仮想的な湖底における面積素片 ΔS を鉛直方向上に水平面に射影した面積素片 $\Delta S''$ を考える。これらの間に次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \Delta S'' &= \Delta S \cdot \cos\theta'' \\ \cos\theta'' &= n_0 \cdot k \end{aligned}$$

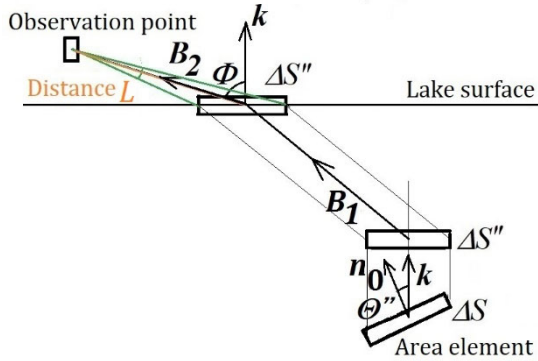


図7. 湖内における光散乱を考える際の仮想的な面積素片の概念図。

Fig. 7. Conceptual diagram of a hypothetical area element accompanied by light scattering inside the lake.

ここで $\Delta S''$ は、直交座標系 (x, y, z) 表示の面積素片で、 $\Delta S'' = \Delta x \Delta y$ と表せる。また直交座標表示による体積素片は $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta S \cdot \cos\theta'' \Delta z$ である。ここで Δ は微小量を示し、 Δz は体積素片についての鉛直方向の増分である。

(b) 光路を制限する因子

3.1(1)(e) で述べた湖底乱反射の場合の制限する因子のうち、③崖による光路制限のみが該当する。

(c) 光強度に乗ぜられる因子

湖底乱反射の場合の項 3.1(1) と同様に、フレネルの反射透過係数の乗算因子も寄与し、強度因子および立体角因子を乗算して、光強度式が含む次式の因子を得る。

$$\Delta Q_S' = \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\phi', \phi) \frac{\Delta z}{\Omega}$$

(d) 光路長の計算

湖内における光散乱を考える際の体積素片の座標を $T_5(x_n, y_n, z_n)$ とすると、対応する湖底の座標 (x_1, y_1, z_1) から次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} x_n &= x_1 \\ y_n &= y_1 \end{aligned}$$

$$z_n = -m \Delta z$$

ここで、自然数 m は、散乱点の z 座標が湖内にあることを条件に取る。

湖内への入射後から散乱点までの線分 $T_2 T_5$ を L_3 、散乱点から湖面での射出までの線分 $T_5 T_3$ を L_4 とし、光路長 L_3, L_4 を次式で表す。

$$\begin{aligned} L_3 &= \sqrt{(x_2 - x_n)^2 + (y_2 - y_n)^2 + z_n^2} \\ L_4 &= \sqrt{(x_3 - x_n)^2 + (y_3 - y_n)^2 + z_n^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、走査する $T_5(x_n, y_n, z_n)$ と観測点座標 $T_4(x_4, y_4, z_4)$ から、四次方程式 (6) において、 T_1 を T_5 と読み替えて解き、解から得られる乱反射光ベクトルを散乱光ベクトルと読み替えて、湖面射出点 T_3 を算出して求める。

(e) ミー散乱の場合の乗算因子

ミー散乱による減衰の因子 F_{Mie} は、光の波長 λ_i において、この光路長を透過する水の光吸収の効果(吸光係数 $A(\lambda_i)$) も含み、パラメータ k を散乱強度因子として散乱光が散乱による減衰の因子から転換因子 U_{Mie} (無次元, $0 \leq U_{Mie} \leq 1$) により、放射されると仮定する。よって散乱光強度因子は次式で与えられる。

$$F_{Mie} = U_{Mie} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}]$$

(f) 密度変動散乱の場合の乗算因子

この場合、強度が波長の 4 乗分の 1 に比例する散乱光を持つため、次式で表される減衰の因子 F_{ES} を、波長 380 nm を基準として表す。

$$F_{ES} = U_{ES} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \left(\frac{380 \text{ nm}}{\lambda_i}\right)^4$$

上式で転換因子 U_{ES} を定めており、これは前述のミー散乱の場合とは次元が同じであるが、数値は異なり、比較はできない。しかし、これを用いて得たパラメータにより呈色をシミュレーションする場合には比較できる。

(g) 湖内散乱光の光強度の算出

前項の湖底乱反射の光強度の算出したがって、湖内散乱光についてそれを算出する。

$$\begin{aligned}
 P_{S,Mie}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) & \\
 &= \beta_{fine} K_m f(\lambda_i) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\phi', \phi) \frac{\rho}{Reffac \cdot \Omega} \\
 &\cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \Delta z
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 P_{S,ES}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) & \\
 &= \beta_{fine} K_m f(\lambda_i) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\phi', \phi) \frac{\rho}{Reffac \cdot \Omega} \\
 &\cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \left(\frac{380 \text{ nm}}{\lambda_i}\right)^4 \cdot \Delta z
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\left. \begin{aligned}
 R_S(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} \sum_{z_n} R(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2}{2\sigma^2}\right] \\
 G_S(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} \sum_{z_n} G(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2}{2\sigma^2}\right] \\
 B_S(\theta, \phi, x, y) &= \sum_{\psi_1} \sum_{t_1} \sum_{z_n} B(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\{x - x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2 + \{y - y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)\}^2}{2\sigma^2}\right]
 \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

$Reffac$ を散乱光の寄与割合を示すパラメータとする。

$$Reffac = \frac{\rho}{U}$$

$$U := \begin{cases} U_{Mie} & \text{ミ一散乱の場合} \\ U_{ES} & \text{密度変動散乱の場合} \end{cases}$$

このとき、湖内の散乱点 $T_4(x_n, y_n, z_n)$ からのミ一散乱光 $P_{S,Mie}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ および密度変動散乱光 $P_{S,ES}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ は、それぞれ(12)(13)式で表せる。

これらの光強度から項 3.1 (1) (k) に準じて等色関数の方法および線形変換 [20] により、

$$R(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n), \quad G(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n),$$

$B(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ を得て、(14)式から湖面上の点 (x, y) における RGB 値 $R_S(\theta, \phi, x, y)$,

$G_S(\theta, \phi, x, y)$, $B_S(\theta, \phi, x, y)$ を得る。

ここで、 $R_S(\theta, \phi, x, y)$, $G_S(\theta, \phi, x, y)$, $B_S(\theta, \phi, x, y)$ は、ミ一散乱または密度変動散乱の場合、それぞれ(12)式、(13)式から算出されるものとする。また、 $x_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$, $y_3(\theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ は湖面に

おける射出点の座標である。

(3) 湖底乱反射と湖内光散乱の項の和による RGB 値の算出

いま湖底面積を S 、湖盆の体積を V とすると、

$$\begin{aligned}
 S &= \frac{\pi r}{6d^2} \left\{ (r^2 + 4d^2)^{\frac{3}{2}} - r^3 \right\} \\
 V &= \frac{1}{2} \pi r^2 d
 \end{aligned}$$

である。湖底乱反射の RGB 強度が湖底の面積素片についての積分で、湖内光散乱は湖内の体積素片についての積分であることから、両者の結合は、(15)(16)式で与えられる。すなわち、RGB 値について、湖底乱反射の場合、添え字 R で表し、散乱がミ一散乱または密度変動散乱の場合、それぞれ添え字 Mie , ES で表し、湖底乱反射の寄与との和について添え字を $total$ とすれば、

$$\left. \begin{aligned}
 R_{total,Mie}(\theta, \phi, x, y) &= R_R + \frac{S}{V} R_{S,Mie} \\
 G_{total,Mie}(\theta, \phi, x, y) &= G_R + \frac{S}{V} G_{S,Mie} \\
 B_{total,Mie}(\theta, \phi, x, y) &= B_R + \frac{S}{V} B_{S,Mie}
 \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

$$\left. \begin{aligned} R_{total,ES}(\theta, \phi, x, y) &= R_R + \frac{S}{V} R_{S,ES} \\ G_{total,ES}(\theta, \phi, x, y) &= G_R + \frac{S}{V} G_{S,ES} \\ B_{total,ES}(\theta, \phi, x, y) &= B_R + \frac{S}{V} B_{S,ES} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$P_{R,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1) = \beta_{cloudy} K_m c(\lambda_i) cint(\theta, \phi) T \frac{\Delta S \cdot \cos\theta \cdot \cos\Phi \cdot \cos\theta'''}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{\rho}{\Omega} \cdot \exp[-(L_1 + L_2)\{k + A(\lambda_i)\}] \quad (17)$$

$$P_{S,Mie,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) = \beta_{cloudy} K_m c(\lambda_i) cint(\theta, \phi) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\Phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{\rho}{Ref\,fac \cdot \Omega} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \Delta z \quad (18)$$

$$P_{S,ES,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n) = \beta_{cloudy} K_m c(\lambda_i) cint(\theta, \phi) \frac{\Delta S \cdot \cos\theta'' \cdot \cos\Phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{\rho}{Ref\,fac \cdot \Omega} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \left(\frac{380 \text{ nm}}{\lambda_i}\right)^4 \cdot \Delta z \quad (19)$$

$$cint(\theta, \phi) = \sin\theta(a\phi^2 + b\phi + c) \quad (20)$$

3.2. 散乱日射の場合

前項で太陽高度 θ および方位角 ϕ の関数として求めた RGB 値が全天からの寄与であるとして、散乱日射の場合の光強度を求める。

光強度の式は、 $P_{R,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1)$ を湖底乱反射光、 $P_{S,Mie,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ を湖内ミー散乱光、 $P_{S,ES,cloudy}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ を湖内密度変動散乱光、散乱日射光の強度因子を $cint(\theta, \phi)$ とし、そのパラメータ a, b, c を花石ほか [13] によるものとする、それぞれ(8)式、(12)式、(13)式に準じて、(17)～(20)式で表せる。

ここで、 $c(\lambda_i)$ は波長 λ_i における散乱日射の分光放射強度であり、花石ほか [13] による。またスケールングファクタは、分光放射強度 $c(\lambda_i)$ と等色関数 $\bar{y}(\lambda_i)$ から次式により得られる照度計算値 $E_{0,cloudy}$ と照度設定値 E から得た β_{cloudy} とする。

$$E_{0,cloudy} = \sum_{\lambda_i} K_m c(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda$$

$$\beta_{cloudy} = \beta_0 \frac{E}{E_{0,cloudy}}$$

上記で β_0 は直達日射条件でのスケールングファクタを含む因子と同じである。

(17)～(19)式から等色関数の方法および線形変換 [20] により RGB 値を求め、(9)式と(14)式により湖面上の各面積区間の RGB 値を求める。最後に湖底乱反射と湖内光散乱の双方を(15)(16)式により考慮する。

全天からの放射の考慮は、すでに直達日射の計算において、湖面での光束強度の正規分布およびその場合の光強度式におけるスケールングファクタを決定している、湖面の同一の面積区間（水平面区間）に、全天からの放射の寄与を取り入れる際に、照度の高い方の寄与をその区間の RGB 値とする計算を行う。この場合の照度は(10)式で相対値が表される。

湖面平均照度に比例する物理量および sRGB 値、電算で扱う 8 ビット長符号なし整数値の RGB 値の算出については、直達日射条件の場合と同じである。

3.3. 木漏れ日 (sunbeam) の解析

湖面に入射する光束を枝葉の隙間から差し込む“木漏れ日(sunbeam)”と考え、以下の解析を行う。

(1) 湖底反射光の経路解析

(a) 乱反射光の射出点座標

デジタルカメラ画像における乱反射光スポットのピクセル座標から、花石ほか [13] の解析理論により、乱反射光の湖面における射出点座標 $(p, q, 0)$ を求める。この座標は観測点位置の西からの偏角 η により回

転済みなので、次式の線形変換により湖沼系に設定した絶対座標系の射出点座標 $T_3(x_3, y_3, 0)$ を得る。

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\eta & \sin\eta \\ -\sin\eta & \cos\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix}$$

(b) 湖面射出後の光束の方向ベクトル

観測点座標 $T_4(x_4, y_4, z_4)$ と射出座標 $T_3(x_3, y_3, 0)$ とから射出後の単位方向ベクトル $\mathbf{B}_2 = (b_{2x}, b_{2y}, b_{2z})$ を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_2 &= (b_{2x}, b_{2y}, b_{2z}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2 + z_4^2}} \cdot (x_4 - x_3, y_4 - y_3, z_4) \end{aligned}$$

(c) 射出前の湖内乱反射光の方向ベクトル

射出後の方向ベクトル \mathbf{B}_2 と大気に対する水の屈折率 n_{12} とから、長谷川の式 [19] により、乱反射光の単位方向ベクトル $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ を求める。

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_1 &= (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z}) \\ &= \left(\frac{b_{2x}}{n_{12}}, \frac{b_{2y}}{n_{12}}, \frac{1}{n_{12}} \sqrt{n_{12}^2 - 1 + b_{2z}^2} \right) \end{aligned}$$

(d) 湖底点座標

木漏れ日の光束が乱反射する湖底点を $T_1(x_1, y_1, z_1)$ とすると、この座標は、湖面射出点 T_3 を通り方向ベクトルが \mathbf{B}_1 の直線上にあることから、座標値について次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_3 + \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1x} \\ y_1 &= y_3 + \frac{z_1}{b_{1z}} b_{1y} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

この湖底点座標値 (x_1, y_1, z_1) が(1)式を満たすことから、

$$\begin{aligned} \frac{x_1^2}{g^2} + \frac{y_1^2}{g^2} - (z_1 + d) &= 0 \\ g &= \frac{r}{\sqrt{d}} \end{aligned}$$

が成り立つ。よって、二次方程式

$$f_2 z_1^2 + f_1 z_1 + f_0 = 0$$

において、係数が

$$\begin{aligned} f_2 &= \left(\frac{b_{1x}}{b_{1z}} \right)^2 + \left(\frac{b_{1y}}{b_{1z}} \right)^2 \\ f_1 &= 2 \frac{b_{1x}}{b_{1z}} x_3 + 2 \frac{b_{1y}}{b_{1z}} y_3 - \left(\frac{r}{\sqrt{d}} \right)^2 \\ f_0 &= x_3^2 + y_3^2 - \left(\frac{r}{\sqrt{d}} \right)^2 d \end{aligned}$$

であり、解である

$$z_1 = \frac{-f_1 - \sqrt{f_1^2 - 4f_2 f_0}}{2f_2}$$

から、(21)式により湖底点座標値 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ を算出する。

(e) 湖面入射点座標

項 3.1(1)(c) の方法により、湖面入射後の方向ベクトル $\mathbf{A}'' = (A''_x, A''_y, A''_z)$ および湖底点座標 $T_1(x_1, y_1, z_1)$ から湖面入射点 $T_2(x_2, y_2, 0)$ を求めることができる。

(2) 散乱光の光路解析

(a) 散乱光の湖面射出点座標および湖面射出前の湖内散乱光の方向ベクトル

これらは、3.3(1) の方法で求めることとする。

(b) 散乱点座標

湖面入射点座標 T_2 と入射光ベクトル $\mathbf{A}'' = (A''_x, A''_y, A''_z)$ 、光射出点座標 T_3 と散乱光の方向ベクトル $\mathbf{B}_1 = (b_{1x}, b_{1y}, b_{1z})$ をそれぞれ媒介変数表示し、散乱点座標を未知数として、媒介変数の決定を行う。このとき二つの媒介変数に対して三つの方程式が成り立ち、overdetermined な状態になるので、行列の特異値分解で最小二乗解を求める。

式を書き下すと、散乱点座標 (x_n, y_n, z_n) についての媒介変数表示は

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} A''_x \\ A''_y \\ A''_z \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} b_{1x} \\ b_{1y} \\ b_{1z} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 $\mathbf{A}'' = (A''_x, A''_y, A''_z)$ は(3)式により求める。(22)

式から

$$\begin{pmatrix} A''_x & -b_{1x} \\ A''_y & -b_{1y} \\ A''_z & -b_{1z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3 - x_2 \\ y_3 - y_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ベクトルおよび行列を次式で略記すると、

$$W = \begin{pmatrix} A''_x & -b_{1x} \\ A''_y & -b_{1y} \\ A''_z & -b_{1z} \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}$$

$$Z = \begin{pmatrix} x_3 - x_2 \\ y_3 - y_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

行列 W を特異値分解すると、

$$W = U^t \Sigma V$$

ここで、 U 、 V はそれぞれ 3×3 、 2×2 の直交行列、 Σ は 3×2 であり特異値 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$) を持ち、これから次の Σ^{-1} が定義される。 t は転置行列の意味である。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\lambda_2} & 0 \end{pmatrix}$$

特異値分解による連立一次方程式の最小二乗解は、

$$Y = V^t \Sigma^{-1} UZ$$

$$P'_{S,Mie}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$$

$$= \beta'_{fine} K_m f(\lambda_i) \frac{\cos \Phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{q}{Reffac \cdot \Omega} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \quad (23)$$

$$P'_{ES}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$$

$$= \beta'_{fine} K_m f(\lambda_i) \frac{\cos \Phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{q}{Reffac \cdot \Omega} \cdot \exp[-(L_3 + L_4)\{k + A(\lambda_i)\}] \cdot \left(\frac{380 \text{ nm}}{\lambda_i}\right)^4 \quad (24)$$

から得る。解ベクトル Y は媒介変数 s, t からなり、これらを用いて(22)式から計算される散乱点座標は一致しない。そこで、 s, t それぞれから(22)式により得られた散乱点座標を算術平均して用いる。

(c) 光路長, 入射, 射出時のフレネルの反射透過係数, 立体角因子に関する因子, 強度因子

これらの因子を 3.1(2) の記述に従って求める。光路長については(11)式により求め、強度因子は次式により得る。

$$\Delta Q'_S = \frac{\cos \Phi}{L^2} D(\theta, \theta') D(\varphi', \varphi) \frac{1}{\Omega}$$

上記で定義される強度因子を含めて、光強度式として、ミー散乱について $P'_{S,Mie}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ 、密度変動散乱について $P'_{ES}(\lambda_i, \theta, \phi, \psi_1, t_1, z_n)$ が、スケールリングファクタ β'_{fine} を導入して(23)(24)式で表される。

β'_{fine} は、[照度] \cdot [長さ] 3 の次元を持ち、 β'_{fine} とは比較できない物理量となる。これらの光強度から項 3.1(1)(k) に準じて等色関数の方法および線形変換 [20] により RGB 値を得る。

4. 画像解析

4.1. 木漏れ日の画像解析

2018年7月24日の現地調査で、湖内および湖底から発せられたと考えられた一筋の光束が観察された。このことから、入射する太陽光を湖面上の枝葉の隙間から射し込んだ“木漏れ日(sunbeam)”と考える。

(1) 画像撮影と色情報の処理

木漏れ日画像は2018年7月24日15:52にPanasonic社DMC-LZ5で撮影した。

画像処理ではRGB値が得られるが、この画像ではR値は小さく、またG値はバックグラウンドで高かったため解析への影響を回避すべく、B値だけを用いた。

(2) 撮影結果と考察

Fig. 8 に木漏れ日画像の原図 (a) およびコントラストを強調した拡大図 (b) を示す。

Fig.8(b) に示した Part I が散乱光と考えられた。Part II と示したその末端が Part I とは異なった色調を示し、ここで光の放射がなくなっていることから、湖底における乱反射と推定された。前者が比較的濃い青色、後者が明るい緑色を含んだ青色であった。これらの色調が異なることは、両者で光放射の機構が異なり、放射強度の波長依存性が異なることを示唆した。すなわち、後段の議論であるように、濃い青色の Part I は、白色的と考えられる湖底乱反射や湖内のミー散乱ではなく、散乱強度に波長依存性がある密度変動散乱由来であることの傍証と考えられた。

この画像を項 3.3 で述べた理論モデルにより解析した。散乱光モデルとしてミー散乱および密度変動散乱を仮定し、散乱光の光強度を再現するパラメータを決定した。

この解析で得られたパラメータは、湖底乱反射および密度変動散乱を考慮した場合、 $k = 0.076 \text{ m}^{-1}$ であった。Fig. 9 に散乱光について B 値の観測値と計算値を示す。この図で、光束の進行とともに散乱光が弱くなる現象が再現された。

(3) 光路決定

項 3.3(1) で構築した光路決定法により、散乱光の座標値と観測値を解析した結果、得られた湖底乱反射光および密度変動散乱光の光路を Fig. 10 に示した。

木漏れ日の光路は、解析結果により、よく説明された。このことは光路解析理論が正しいことを示す。

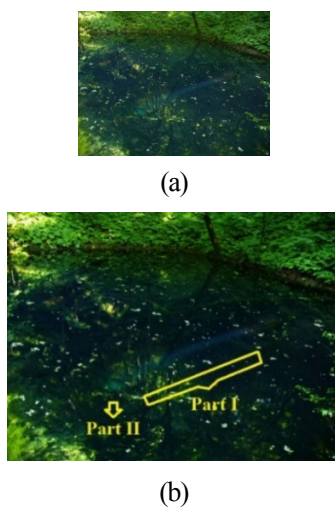


図 8. 木漏れ日の画像. (a) 原図, (b) コントラストを強調し拡大.

Fig. 8. Pictures of sunbeam observed inside the lake. (a) The original picture, (b) the redrawn picture with high contrast and extended.

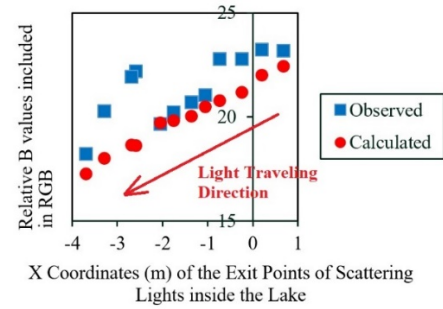


図 9. 木漏れ日の光散乱点の画像から得られた B 値の実測値と計算値. 湖底乱反射および密度変動散乱がある場合.

Fig. 9. Relations between observed B values from the sunbeam images and calculated B values in case of the contributions of irregular reflection at bottom and density fluctuation scattering inside the pond.

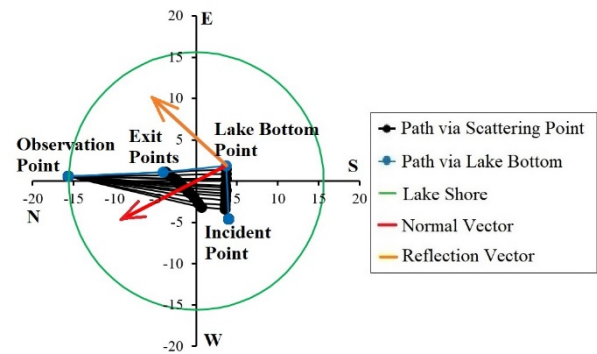


図 10. 木漏れ日の解析により得た光路図. 湖底乱反射および密度変動散乱がある場合.

Fig. 10. Light paths obtained by the sunbeam analysis in case of the two contributions of irregular reflection at bottom and density fluctuation scattering inside the pond.

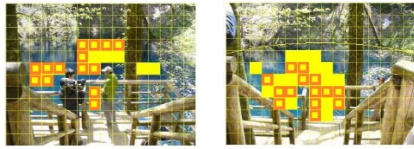
4. 2. 直達日射時の湖面画像の解析によるモデル・パラメータの決定

(1) 方法

画像撮影は 4.1(1) によった。晴天の直達日射条件であった 2017 年 5 月 2 日の 10:07 および 11:35 の青池画像を用いた。

上谷 [23] の方法により基準化した青池のデジタルカメラ画像から、画像における色情報を、花石ほか [13] の方法により青池に設定した座標系における座標値とともに得た。

ここで画像の基準化とは、デジタルカメラの画像を同一の明暗基準で比較するために、画像の電子ファイルに対して、撮影条件から明暗補正を行うことを意味する [23]。本研究では、明暗基準を、絞り f/2.8, 露光時間 1/100 s, ISO 感度 100 とした。



(a) 1007h, 2 May (b) 1135h, 2 May

図 11. 解析に供した画像 (基準化済み) の画素。

Fig. 11. Image elements utilized for analyses after standardization.

Fig. 11 に RGB 値の採取を行ったデジタルカメラ画像の画素を画像上の黄色で示し、解析に供した画素を橙色枠で示した。前者は、解析に耐えうる画素数が 14 であった。後者の数はそれを超えたので、双方の時刻に同じ重みを持たせるため、無作為に 14 個の画素を選び解析に用いた。

得られた RGB 値のうち GB 値および座標値を用いて、項 3.1 に示した呈色に対する理論モデルにより、①湖底乱反射およびミー散乱、②湖底乱反射および密度変動散乱を仮定し最適化を行い、モデル・パラメータを決定した。

(2) 結果

湖底乱反射および密度変動散乱を考慮した場合について、Fig. 12 にシミュレーション画像、湖底乱反射および散乱光の寄与を、また Fig. 13 に GB 値のフィッティングの状況を示した。

一方、呈色の寄与が湖底乱反射およびミー散乱と仮定し強度計算を行い得られたパラメータを用いたシミュレーション画像を Fig. 14 に示した。ミー散乱については、Fig. 12 と同じ日時の青池画像を解析して最適化されたパラメータにより計算した結果を示したが、 $Reffac > 120$ と算定され、ミー散乱による呈色は青色呈色にほとんど寄与しなかった。よって、以下では散乱光として密度変動散乱を採用した場合についてのみ記述した。決定されたモデル・パラメータを Table 1 に示す。

(3) 考察

本研究で得られた結果は、密度変動散乱が湖面の画像に現れていることを示す。密度変動散乱を起こす物質については、先行研究 [3-6] で取り上げられているように水分子そのものと推定された。また、高松ほかの研究結果 [10] で示されたように、散乱強度が同一の波長依存性を示すレイリー散乱の原因となるケイ酸塩鉱物微粒子の可能性もある。これら二者のうち、今回の解析結果は、そのどちらか一方へ帰属できるものではなかった。また現象として、湖底乱反射の寄与が緑色を帯びた青色であるのに対して、密度変動散乱の寄与は濃い青色であり、画像の解析によりこれらの因

子が分離された。これらが前項で述べた木漏れ日の画像中の湖底乱反射光と散乱光の色調に対応すると考えられる。

Fig. 14 に示したとおり、可能性のある光散乱をミー散乱にすると、散乱光の強度が無視できる程度という結果を与えた。Fig. 13 に示した密度変動散乱を仮定した場合について、最適化計算の残差平方和をデータ数から 1 を引いた数で除し平方根を取った値を指標として、ミー散乱の存在を仮定した Fig. 14 のものと比べると、相対値で前者が 18.54、後者が 20.20 であり、密度変動散乱モデルのほうが優れているという結果であった。

なお、湖底乱反射および密度変動散乱のモデルにおいて、後者の散乱角を考慮して計算すると、その依存性は 3%以下と小さいため、ここでは散乱角を無視することとした。

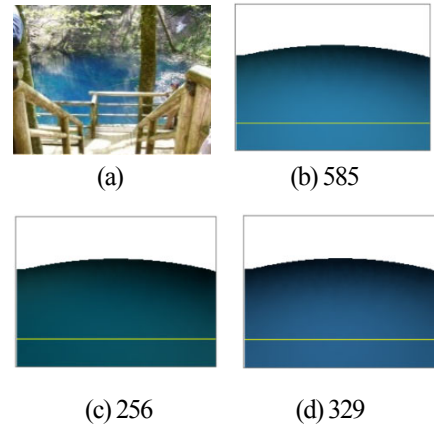


図 12. 湖底乱反射と密度変動散乱を仮定して最適化により得た青池画像のシミュレーション結果. (a) 基準化した青池画像, (b) シミュレーション, (c) 湖底乱反射の寄与, (d) 密度変動散乱の寄与. 画像下の数値は湖面平均照度の相対値を示す。

Fig. 12. Simulated results obtained on the assumption of existence of irregular reflection at lake bottom and density fluctuation scattering. (a) Standardized picture, (b) its simulation, (c) contribution by irregular reflection at bottom, and (d) contribution by density fluctuation scattering. Numerical values below the images indicate relative values of the illuminance averaged over water surface.

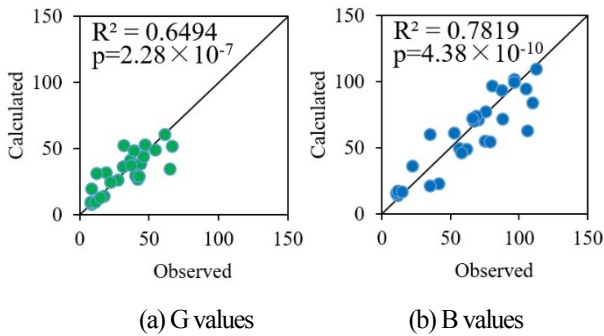


図 13. 湖底乱反射光と密度変動散乱を考慮した場合の青池画像の GB 値に対する観測値と計算値の関係。

Fig. 13. Relations between observed GB values and calculated values in the images of Aoike Pond. Irregular reflection at bottom and density fluctuation scattering are considered.

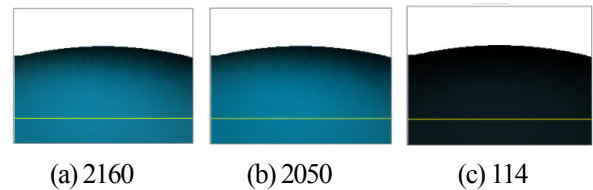


図 14. ミー散乱を仮定した場合の青池画像のシミュレーション結果. (a) シミュレーション, (b) 湖底乱反射の寄与, (c) ミー散乱の寄与. 画像下の数値は湖面平均照度の相対値を示す。

Fig. 14. Simulated results obtained on the assumption of existence of irregular reflection at lake bottom and Mie scattering. (a) Simulation, (b) contribution by irregular reflection at bottom, and (c) contribution by Mie scattering. Values below the images indicate relative values of the illuminance averaged over water surface.

表 1. 画像解析における設定パラメータと与えられた値。

Table 1. Parameters for the image analyses and their given values.

r	Radius (m) of the paraboloid	15.6
w	Horizontal distance (m) from the lake side to the observation point	0.4
d	Maximum depth (m) of Aoike Pond	8.8
h	Height (m) of observation point	7.2
ξ	Height (m) of the cliff	20
δ	Slope angle (degree) of the cliff	60
η	Observation point angle (degree) from the west direction	60.5
-	All-sky angle increment angle (degree) with diffused solar radiation	40
$\Delta\lambda$	Increment of wavelength (nm) in the wavelength integral	5
β_0	in lx^{-1}	8.70×10^{-2}
σ	in m	5.30
k	in m^{-1}	0.146
ρ	Non-dimension	0.25
Reffac	Non-dimension	4.20
$\Delta\psi$	Increment of angle (degree) at which the bottom points are scanned	40
Δt	Increment of parameter (non-dimension) at which the bottom points are scanned	0.2
Δz	Increment (m) of vertical points at which scattering points are scanned	0.5
n_{12}	Refractive index (non-dimension) of water to atmosphere	1.333

5. モデル計算

5.1. 直達日射の観測日における毎正時の青池湖面画像の再現, ならびに直達日射および散乱日射条件の青池湖面画像の再現

(1) 方法

項 4.2 で得たパラメータを用いて, 5月2日の8時から15時までの毎正時における直達日射条件での青池画像を再現した。

また, 2017年5月2日, 2018年5月26日, 7月24

日および7月25日における直達日射または散乱日射条件の青池画像を基準化し, 前項 4.2 で得たパラメータを用いて再現した。

画像撮影は 4.1(1) によった。なお, 青池画像撮影時の照度は, 青池近傍の物産館(青池より約0.6km北)において, Zhangzhou WeiHua Electronic 社 LX-1010B を用いて測定した。

(2) 結果と考察

Fig. 15 に示したとおり, 毎正時における直達日射条

件での湖面の呈色は、色調・明暗の不均一性を伴い、朝から夕方までに変化した。午前明るさの立ち上がりが早く、また午後は午前と比べると早くに暗化した。これは後述の湖面平均照度の二次元グラフで明らかになる。

Fig. 16 に示した、直達日射および散乱日射条件での湖面の基準化観測画像とシミュレーションによる再現は、定性的ではあるが概ね一致していた。

5.2. 青池カラーチャートの描画

(1) 方法

ここでは、湖面の定点として青池のみかけの中央点 $(x, y) = (-3.85 \text{ m}, 0)$ (観測方位角で回転済み座標値; 花石ほか [13]) の呈色を、暦日・時刻を変えてシミュレーションし、横軸に時刻、縦軸に暦日を配した二次元グラフ「青池カラーチャート」を提案する。ここでは、観測方位を展望台位置 (西から北へ $\eta = 60.5^\circ$) とし最大水深を青池の現実の $d = 8.8 \text{ m}$ とともに、 $d = 5 \text{ m}, 15 \text{ m}$ として計算した。また、散乱日射の場合について計算した。

(2) 結果と考察

Fig. 17 に示すように、現実の青池の最大水深 ($d = 8.8 \text{ m}$) において、湖底乱反射と密度変動散乱の双方が同じ程度で寄与していた。最大水深を仮想的に $d = 5 \text{ m}$ に取ると湖底乱反射の寄与が相対的に大きくなり、逆に最大水深 $d = 15 \text{ m}$ に取ると密度変動散乱の寄与が大きくなった。

青池の青色色彩に關与する光学現象は、湖底乱反射および湖内における密度変動散乱と考えられた。今回、採用した回転放物面モデルを用いて計算した「青池カラーチャート」により、水深が浅く前者の寄与が大きいと青色が淡くなり、水深が深く前者の寄与が小さいと濃い青色となることが示された。

5.3. 湖面の平均照度の暦日・時刻依存性

(1) 方法

(10)式で表される直達日射条件での湖面平均照度 (相対値) について、青池カラーチャートと同じ縦横軸の二次元グラフで、湖底乱反射の寄与および湖内光散乱の寄与の和ならびにそれぞれについて示す。

(2) 結果と考察

Fig. 18 のとおり、湖面平均照度については湖底乱反射と密度変動散乱がほぼ同じ程度で寄与していた。湖面平均照度は4月から9月の10時から12時および6月と7月の12時から13時が高い結果であった。このことから、この暦日・時間帯に直達日射があれば、明るい青色が観測されると解釈できる。ただし、花石ほか [13] で述べているように、夏期から秋期は湖面上の木々の枝に葉が繁茂し、湖内への日射が弱くなることが認められており、実際の青色の明度は、夏期の前までが高いと考える。また、湖面平均照度の湖底乱反射の寄与は、春秋に極大があり夏期は鞍部になったが、その程度は割合小さかった。

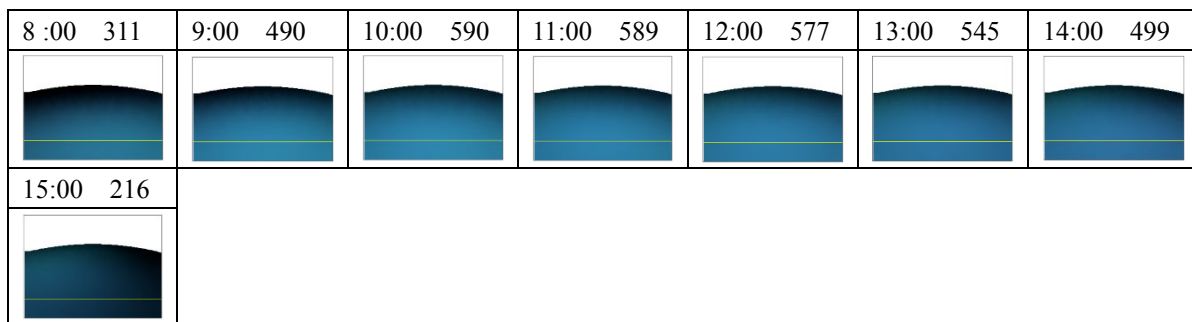


図 15. 5月2日における各時刻 (毎正時) の青池画像の変化のシミュレーション結果 (数値は湖面平均照度の相対値)。直達日射条件下の場合。

Fig. 15. Simulated results for the hourly change of Aoike Pond images on May 2. The numerical value to the right of each time expresses the relative illuminance averaged over lake surface under condition of direct solar radiation.

Date and time	Original picture	Standardized picture	Simulation	Exposure time ISO sensitivity	Weather	Solar radiation illuminance (lx)	Relative average illuminance on the lake surface
5/2/2017 10:07				1/80 s ISO80	Fine	Estimated, 100000	591
5/2/2017 11:35				1/100 s ISO100	Fine	Estimated, 100000	585
5/26/2018 12:06				1/30 s ISO100	Fine	Estimated, 100000	573
7/24/2018 12:24				1/25 s ISO100	Cloudy	34500	239
7/24/2018 13:57				1/8 s ISO100	Cloudy	28500	197
7/24/2018 14:56				1/8 s ISO100	Cloudy	22400	155
7/25/2018 9:15				1/8 s ISO100	Cloudy	17200	119
7/25/2018 10:54				1/13 s ISO100	Cloudy	23100	160

図 16. 青池画像と感度補正後画像，およびそのシミュレーション結果と条件.

Fig. 16. Images of Aoike Pond, standardized images and their simulated images with given conditions.

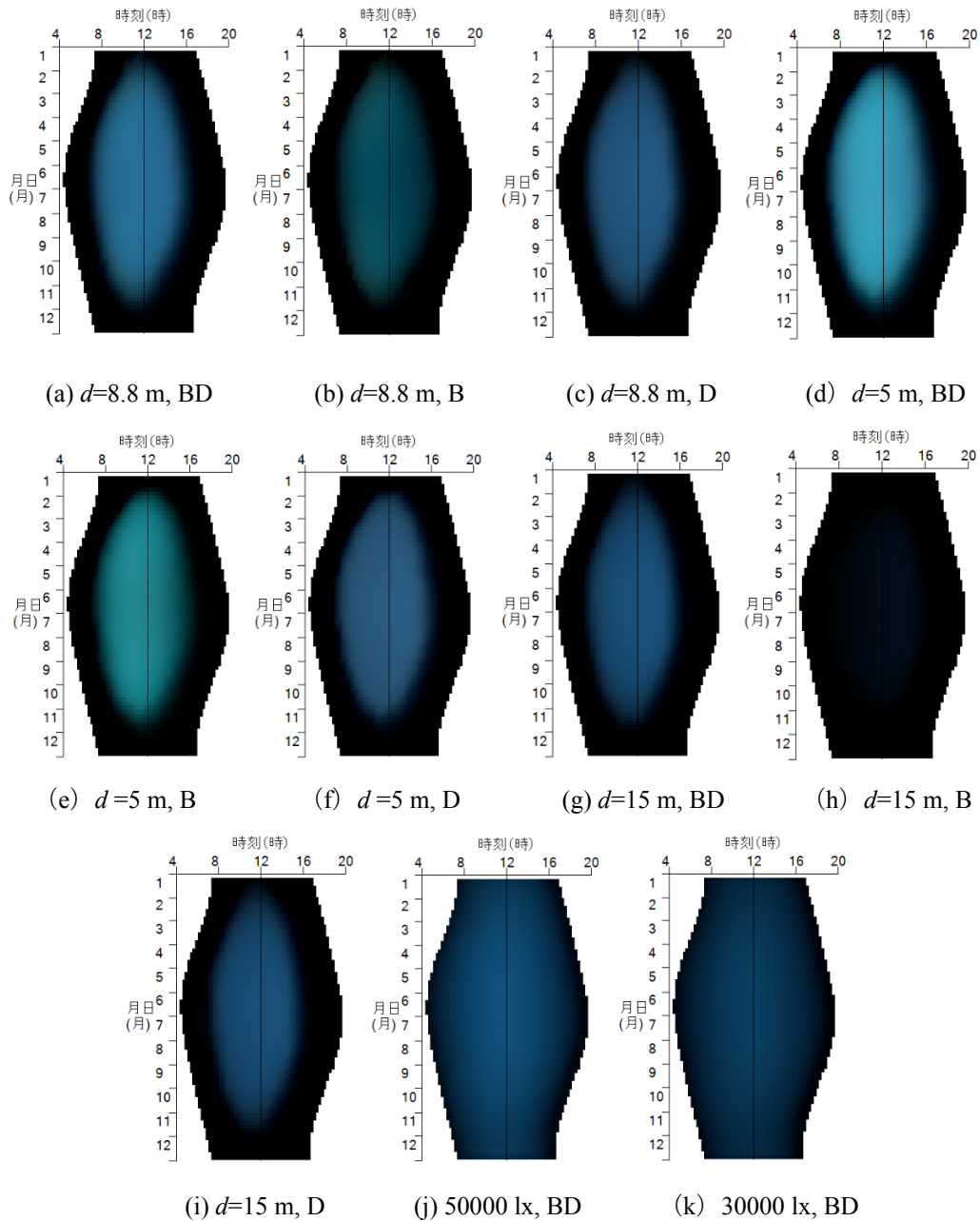


図 17. 青池カラーチャート. (a)~(i) : 直達日射条件下で最大水深 d を変えた場合, (j) と (k) : 散乱日射条件下 (最大水深 $d=8.8$ m に固定) を仮定した場合. BD: 湖底乱反射と密度変動散乱が寄与する場合, B: 前者のみが寄与, D: 後者のみが寄与.

Fig. 17. Aoike color charts. The charts (a) – (i): Under condition of direct solar radiation with different maximum depths. The charts (j) and (k): Under condition of diffused solar radiation with the maximum depth $d = 8.8$ m. BD: contribution by both the irregular reflection at lake bottom and density fluctuation scattering inside the pond, B: by the former only, D: by the latter only.

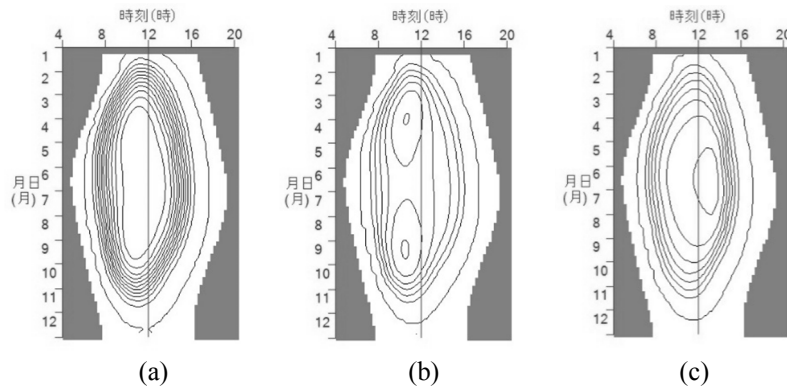


図 18. 直達日射時の湖面平均照度（相対値）の暦日・時刻依存性. (a) 湖底乱反射と湖内密度変動散乱が寄与する場合, (b) 前者のみ寄与する場合, (c) 後者のみ寄与する場合.

Fig. 18. Calendar day/time dependencies of the relative illuminance averaged over lake surface under direct solar radiation condition. (a) Contribution by both irregular reflection at bottom and light scattering inside the pond, (b) by the former only, and (c) by the latter only.

6. 結論

本論文では、青池における水中の光学現象について、湖水が次の2つの条件をもつものとして議論した。その条件とは、①可視領域に光吸収を持つ物質が水以外に極めて希薄なこと、②透明度が高く懸濁物質濃度が低いため、白色的ミー散乱に比べて、水分子による密度変動散乱の効果が際立つこと、である。この2条件により、水の可視領域における赤色光吸収によって、水中の光路を進行する光は、緑と青色の光が残ると考えられ、また密度変動散乱が短波長光に強い散乱強度を持つため、散乱光は青色光が強調されると判断した。さらに、地質学的条件として、明るい色の湖底により湖底乱反射が有効な可能性があるとした。

以上の考え方から、青池の呈色を湖底乱反射および湖内光散乱（ミー散乱あるいは密度変動散乱）によるものと仮定した物理モデルを構築し、画像観測値解析によりモデル・パラメータの最適化を行った。その結果、湖底乱反射および密度変動散乱が青池の青色呈色に寄与していることが示された。

色調について、湖底乱反射による呈色は緑色を帯びた青色であり、一方、密度変動散乱光は濃い青色であった。これらの二つの呈色機構は、青池カラーチャートでの一つの設定値である“最大水深”の違いによって異なる寄与を示した。このとき、自然条件である最大水深8.8 m は、両者がほぼ同じオーダーで寄与する条件となった。

湖面平均照度は、直達日射条件下では午前中に大きな値を取ることから、太陽光が湖面に直達する日は、午前中に明るい青色を観測できる可能性が高いと判断された。

以上から、青池の青色呈色は、湖底乱反射と湖内光

散乱である密度変動散乱によって説明できる。青池の青色呈色の要因は、自然条件として、①乱反射が有効な湖底の明るさ、②青色色彩が適度の濃淡になるような最大水深、③湖底乱反射が湖面上に届き、かつ湖内の密度変動散乱光が際立つ高い透明度、という三つの条件が揃うことであることが定量的に示された。

謝辞

本研究を進めるに当たって、鹿児島大学 南九州・南西諸島域共創機構 産学・地域共創センター 連携推進部門 特任准教授 古里栄一先生から貴重なご示唆をいただきました。また、福島大学大学院理工学群 教授 塘 忠顕先生からは、貴重な文献を提供していただきました。これらの方々に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

1. Jerlov NG (1976): *Marine Optics*, 2nd ed., Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 231pp. ISBN 0-444-55294-4.
2. Kirk JTO (2010) *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, 3rd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 649pp. ISBN 978-0-521-15175-7.
3. Smith RC and Tyler JE (1967): Optical Properties of Clear Natural Water. *Journal of the Optical Society of America*, **57**: 589-595.
4. Smith RC, Tyler JE, Goldman CR (1973): Optical Properties and Color of Lake Tahoe and Crater Lake. *Journal of Limnology and Oceanography*, **18**: 189-199.
5. Morel A, Prieur L (1977): Analysis of variations in ocean color, *Journal of Limnology and Oceanography*, **22**: 709-713.
6. Davies-Colley RJ, Vant WN, Smith DG (1993): Colour and Clarity of Natural Waters Science and Management of Optical

- Water Quality, The Blackburn Press, Caldwell, USA, 310pp. ISBN 1-930665-71-7.
7. 三上 一・石塚伸一・佐藤真理子・今 俊夫・野呂幸男・対馬和浩・阪崎俊暉・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.
 8. 高貝慶隆・遠藤 新・岡本香奈・阿部遼太 (2015): 五色沼湖沼群の青色要因の調査を目的とする日本各地の青色湖沼との共通点と相違点. 磐梯朝日遷移プロジェクト: 裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査報告書, 福島大学理工学群共生システム理工学類, 福島, 177pp.
 9. 青森県西津軽郡深浦町 (2019): 津軽国定公園十二湖. URL: <http://www.town.fukaura.lg.jp/lake12hp/firstP.html> (2019年5月18日時点)
 10. 高松信樹・磯野正典・網田和宏 (2008): 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 花石竜治・大坂直人・知北和久 (2018): 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. 青森県環境保健センター年報, **29**: 26-52.
 14. 工藤精一・三上 一・中村 稔・工藤 健・高井秀子・角田智子・珍田雅隆・和泉四郎 (1986): 津軽十二湖の水質の現状. 青森県公害調査事務所所報, **8**: 78-83.
 15. 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.
 16. 青森県史編さん自然部会編 (2001): 青森県史自然編地学. 青森県, 青森, 625pp.
 17. 鶴田匡夫 (1990): 応用光学 I 応用物理工学選書 1. 培風館, 東京, 322pp. ISBN 4-563-02331-0.
 18. 赤坂 裕 (1992): 気象データとその応用. 建築環境学 1 (木村健一編), 第 1 章, 1-34, 丸善, 東京. ISBN: 4-621-03706-4.
 19. 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.
 20. 大田 登 (2001): 色彩工学 第 2 版. 東京電機大学出版局, 東京, 310pp. ISBN 4-501-61890-6.
 21. Pope RM, Fry ES (1997): Absorption Spectrum (380-700 nm) of Pure Water. II. Integrating Cavity Measurements. *Applied Optics*, **36**: 8710-8723.
 22. 日本工業標準調査会・審議 (2004): 日本工業規格 JIS X9204:2004 高精細カラーディジタル標準画像 (XYZ/SCID), 日本規格協会, 東京, 24pp.
 23. 上谷芳昭 (2001): ビデオ測色法とその応用. *Journal of the Illuminating Engineering Institute of Japan*, **88**: 479-483.

受付: 2019年5月20日

受理: 2019年8月20日

2019 年度会務報告

運営委員長・知北和久

I. 全国大会の開催

2019 年度第 41 回全国大会 (信濃大町大会) は 2019 年 11 月 9 日～10 日に開催され、9 日の研究発表会は長野県大町市の市立山岳博物館で行われた。今大会の実行委員長は、同博物館長の鈴木啓助氏である。参加人数は 28 名で口頭発表 24 件、ポスター発表 9 件の発表があった。学生発表 8 件に対し、審査の結果、信州大学の西村基司氏と上原元樹氏に学生優秀発表賞が授与された。

11 月 9 日午後 3 時～5 時には、同博物館にて主催：陸水物理学会、共催：大町市立山岳博物館・信州山の環境研究センター、による公開講演会「テーマ：大町の恵＝山と水」が開催され、4 人の演者による講演と総合討論が行われた。

11 月 10 日の午前 8 時～午後 4 時には陸水物理学会主催による現地見学会が開催され、参加人数は 20 名であった。見学場所は、立山黒部アルペンルートを利用した。午前 8 時にバスで信濃大町駅を出発し、途中、黒部溪谷にある黒部ダムを見学しながら、昼頃にルート内の最大標高 2,450 m にある室堂駅に到着した。同駅の近くでは、火山ガスの噴出箇所や火山性池沼の“ミクリガ池”を見ることができた。同ルートの最終駅は立山駅で、同駅の近くには国土交通省の“立山カルデラ砂防博物館”があり、同館の学芸員から“1858 年安政の大災害”について説明を受けた。

II. 運営委員会報告

全国大会に先立つ 2019 年 11 月 8 日に、大町市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) 運営委員長の交代
審議の結果、現在の運営委員長である北海道大学・知北和久氏の再任が決定された (任期 2020 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日)。
- 2) 今後の運営体制
今後の運営体制として、新運営委員に横浜国立大学・濱 侃氏が加わることとなった。
- 3) 大会での公開講演について
昨年の石垣大会に初めて公開講演会を行ったが、本大会も含め、今後も大会の受け入れ先の状況に応じて開催するよう努力することが確認された。また、講演時間によっては、一般研究発表は金曜日の午後からとすることも検討された。
- 4) 会誌の発行と周知

昨年の石垣大会で確認された「陸水物理学会誌」の発行について、原著論文 1 篇が発行されることとなり、これを踏まえて今年 12 月 1 日付で第 1 巻第 1 号が発行されることとなった。これについて、北海道大学・石井吉之編集委員長より会誌のデザインが披露され、これが承認された。また、J-Stage への登録も検討された。

5) 来年度の大会について

2020 年度大会は、鹿児島大学・古里栄一氏にお世話いただくことになり、今後、その日程と開催場所については事務局と調整していくこととなった。

報告：

1) 会計報告

事務局・知北より、別紙資料に基づき 2018 年度の決算報告、2019 年度 4 月～11 月の収支報告があり、これが承認された。

2) 2020 年度地球惑星連合大会におけるセッションの共催について

当会員がコンビナーを行っている AGU との共同セッション「流域の物質輸送と栄養塩循環-源流域から沿岸海域まで-」(Materials transport and nutrient cycles in watersheds; from headwaters to coastal seas)について、当会も共催することが確認された。

3) HRL(Hydrological Research Letters)について

若い研究者を対象とした原稿が募集中であることが報告された。

III. 総会報告

11 月 9 日(土)昼に大町市立山岳博物館にて総会が開催された。

議題：

- 1) 運営委員長の交代
- 2) 今後の運営体制
- 3) 大会での公開講演について
- 4) 会誌の発行と周知
- 5) 来年度の大会について
以上の議題 1)～5)について、運営委員会での審議内容が説明され承認された。

報告：

- 1) 会計報告
- 2) 2020 年度地球惑星連合大会におけるセッションの共催について
- 3) HRL(Hydrological Research Letters)について
報告事項 1)～3) について、承認された。

「陸水物理学会誌」投稿規定

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

本規定は、2019 年 3 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」以外の部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, 図表中のすべての英数字はTimes New Roman体とする。図は鮮やかな画像ファイル (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10pt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10pt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 10.5pt** で記すこと。写真は図として扱う。表は画像ファイルではなく、編集可能なオリジナルを挿入する。

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} , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ 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。

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.」の順に記載する。著者と著者の間は「・」でつなぐ。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.

英文の場合

「著者名(年号): タイトル. 雑誌名, 巻: ページ.」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: McMahan A, Moore RD (2017): Influence of turbidity and aeration on the albedo of mountain streams. *Hydrological Processes* **31**: 4477–4491.

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, 520pp.

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, 646pp.

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)

編集後記

待望の陸水物理学会誌創刊号をお届けします。高いインパクト・ファクターの国際学術誌への論文投稿が推奨される昨今の学术界情勢の中で、何で今さら小規模な和文学会誌を出版するのか疑問に思われるかもしれません。しかし、私達はそうは思っておりません。森林だってスギの一斉林より雑木林の方が食害・虫害・気象災害などの外敵に強いではありませんか。通常の国内外の学術誌では収めきれないような論文でも、学術研究の多様性を尊ぶ本誌であれば掲載できます。ちなみに今号では、20 ページに及ぶ長文の原著論文が掲載されました。普通であれば3分割されて掲載されるのかもしれませんが、著者にとっては書きづらく、読

者にとっては読みにくくなってしまおうでしょう。1本の論文として掲載できるのが本誌の強みでもあります。

本誌の表裏表紙には「水の色」に近い浅葱色を用いました。水問題の研究をされている今上陛下をはじめとする皇室に所縁の深い色使いを心がけたつもりですが、萌葱色や萌黄色の勘違いだったようでお恥ずかしい限りです。しかし、水の研究者集団にとっては「結果よし」だったのでは、と自己満足しています。

すでに次の投稿論文の査読工程も進められています。会員の皆様のますますのご支援をお願い致します。

(編集委員長 石井吉之)

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	石井 吉之 (北海道大学)
	委員	柴田 智郎 (京都大学)
	委員	藤井 智康 (奈良教育大学)

陸水物理学会誌 第1巻 第1号

2019年12月1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. 1, No. 1

December, 2019

Contents

Foreword	..... Keisuke SUZUKI	... 1
Original Papers		
A study on the coloration of Aoike Pond, Aomori Prefecture: Image analyses and modeling	..... Ryuji HANAISHI, Naoto OSAKA and Kazuhisa CHIKITA	... 3
Announcements	.....	25
Instructions for Authors	.....	27
Submission Guidelines	.....	29
Editor's Postscript	.....	32

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/>