

分光放射観測による五色沼の水の色

渡邊 明・鈴木悠也・酒井貴紘・高貝慶隆・松枝 誠（福島大学・共生システム理工学類）・
佐藤一男（福島大学大学院・実践教育推進センター）

要 旨

裏磐梯湖沼群の水色の分光放射特性を明らかにするため、分光放射計を用いてその特性を計測した。ここでは白色板を用いて水面からの反射分光放射量と白色板による反射分光放射量との比を波長毎に求めることで基準化し、放射特性を求めた結果、可視領域の波長帯の白色板との比と近赤外の波長帯域の白色板との比で、可視領域の波長帯域の比が相対的に大きい湖沼群として、深泥沼、赤沼、瑠璃沼があり、近赤外の波長帯域の比が相対的に大きい湖沼群として、毘沙門沼、竜沼、弁天沼、柳沼、弥六沼、青沼があることが分かった。また、赤外の比の最も大きい竜沼、弁天沼、次いで大きい青沼、弥六沼、柳沼、最も小さい瑠璃沼、深泥沼、赤沼、毘沙門沼と3つに区分された。さらに、波長帯域の放射特性としては可視領域の赤色系で2つのピークを持つ深泥沼、緑系が非常に卓越している弁天沼が分光放射特性として検出できた。

I. はじめに

裏磐梯五色沼湖沼群は、それぞれ色の異なった美しい水色を持つことで知られている。湖沼の水色については、これまで分析化学的視点から多くの研究がされており、特に、千葉（1989）は湖水に含まれるアロフェンの散乱が五色沼の青白色の原因であることを指摘している。基本的に湖沼の水の色は可視光線領域の電磁波の反射、散乱光を認識している。ここでは、それぞれの湖沼がどのような反射・散乱特性があるかを直接分光放射計で計測することで、それぞれの湖沼の水色の特性を理解することを目的とした。

II. 測定方法

可視光線領域の分光放射観測として英弘精機株式会社製 MS-720 の携帯型を用いた。この MS-720 分光放射計は、ドイツの Zeiss 社製の分光器を用いた回転格子により分光した入射光を 256ch のシリコンフォトダイオードアレーによって検出するもので、分光放射計測帯域は 350 nm から 1150 nm までの波長帯を、波長分解能 3.3 nm

で計測できる。なお、温度補正機能を有しているものの、観測精度としては 5% 程度の温度依存性がある。さらに、入射筒を差し替えることによって入射角 180°、90°、10° の三段階で計測可能になっているが、ここでは限定された領域の放射量を計測するため、入射光を 10° に設定し、限定した領域での分光放射量を計測した。なお、太陽高度角や天気等によって放射量が変化するため、時間差を 1 分以内で標準白色板（日本色彩研究所製、380~780 nm の電磁波の反射率 90.0%）の反射光を同装置により測定を行い、ここでは白色板との比率で基準化することで、各湖沼の反射・散乱特性を抽出することを試みた。

渡邊（2012）はリモートセンシングの基本的な手法を用いて阿武隈川の水の色や汚濁等を計測することを試みているが、太陽高度などの基準化が的確にされておらず、水色や懸濁度を適切に表現できていない。しかし、岡見ほか（1982）は霞ヶ浦の分光反射率を計測することで汚濁などの水質判定を行っており、さらに、沖ほか（1996）は具体的なクロロフィル濃度を分光放射

の波長帯域の差で回帰式を作成して濃度設定をしており、分光放射観測の有用性を示している。

分光放射計で計測している放射量は一般に湖沼水面からの反射・散乱光で、幾何学的散乱は基本的に白色板の計測で規格化することが可能で、それ以外の反射・散乱光が計測されていると考えられる。散乱光は散乱体の大きさに依存し、粒子が波長より大きいときは幾何学的散乱となるが、粒子径と波長が同じような場合は Mie 散乱に、また、粒子径が小さい場合は Rayleigh 散乱となる。Rayleigh 散乱強度は入射光に対する散乱光とのなす角を θ とすると $I(\theta)$ は、

$$I(\theta) = \frac{I_0 \pi^4 d^6}{8R^2 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta)$$

で表現できる。ここで I_0 は入射光強度、 m は屈折率、 R は散乱粒子からの距離、 λ は波長、 d は散乱粒子の粒径である。原理的に白色板を使用することによる差異は湖沼の中に存在する散乱粒子の粒径 d に大きく依存することとなる。 R は船縁を用いて水面約 20 cm とした。

III. 測定結果

図 1 に五色沼湖沼群の位置を示す。このうち



図 1 五色沼湖沼群の位置

今回観測した湖沼は、毘沙門沼、赤沼、深泥沼、竜沼、弁天沼、柳沼、弥六沼、青沼、瑠璃沼の 9 つの湖沼で 7 月 20 日と 9 月 27 日から 28 日にかけて実施した。

1. 毘沙門沼

図 2 は 7 月 20 日に観測した毘沙門沼の水面か

らの反射光の波長ごとの分光放射量を示したものである。水面の色は太陽光の水面での散乱だけに依存しているわけではなく、空や雲などの透過光の散乱や反射によるものや、湖底や周辺環境場の反射や散乱光も水面で反射・散乱して色として認識される。その認識される分光放射量は当然入射光に大きく依存する。図 2 に示した毘沙門沼

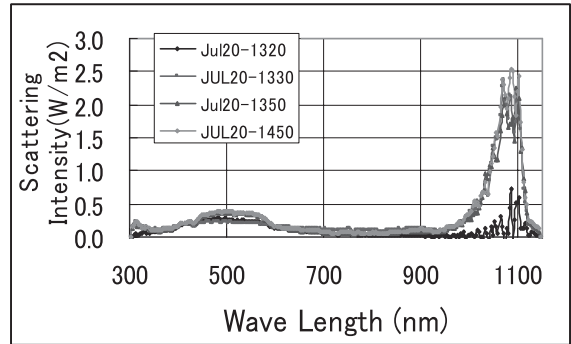


図 2 毘沙門沼の反射光の 3 nm 毎の分光放射量

の分光放射量では相対的に 500 nm の緑色付近でピークを有していることが分かる。近赤外である 700 nm 以上の波長から 900 nm まではほとんど湖沼中に吸収されるが、950 nm を過ぎるとまた相対的に大きなエネルギーが湖面から反射・散乱されていることが分かる。この傾向は 9 月の観測でも同様である。

太陽高度や環境要因の差異を基準化するため、白色板を用いた反射光の分光放射量と、水面からの分光放射量との波長毎の比を用いて、波長ごとの強度を見たのが図 3 である。図 3 は毘沙門沼の 11 地点で計測した平均値である。すなわち、毘

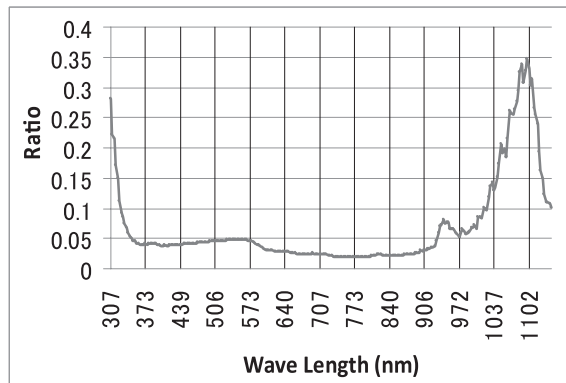


図 3 毘沙門沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

沙門沼では300 nmから350 nm(紫色)と550 nm前後(緑色)が黄色から赤色系より卓越して反射していることが分かった。これは実際の毘沙門沼の色ともよく対応している。なお、これが水中に存在する粒子で散乱されていると仮定すると、こうした波長より小さな粒子が湖沼中に存在することになる。

2. 赤沼

図4に赤沼で観測した水面からの反射分光放射

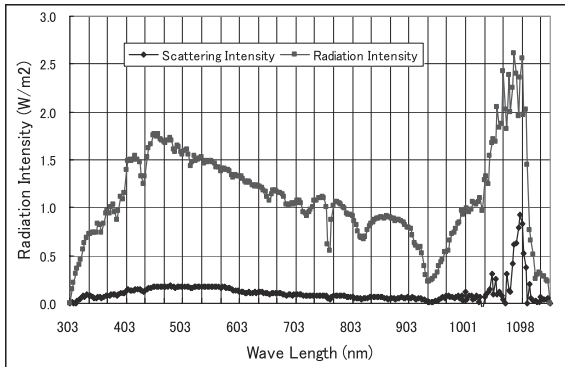


図4 赤沼の水面からの反射光とその時の白色板からの反射光の分光放射強度

射量と白色板からの反射分光放射量を示す。反射強度は白色板にたいして1/8程度であるが、毘沙門沼とは異なり相対的500 nmから600 nm付近の波長帯が卓越していることがわかる。これらをより明らかにするために前述の手法により白色板に対する湖沼水面からの分光放射量比を求めた

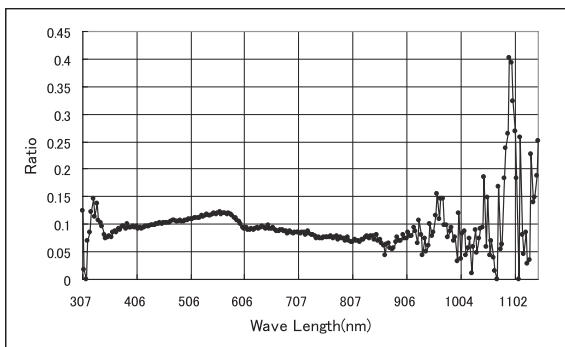


図5 赤沼水面と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

のが図5である。反射比率でも570 nm(橙色)付近に顕著なピークが認められ、外見的水面の色とも一致している。ただし、これは水中に含まれている粒子のみによる散乱光というより、沼底

の土壌面からの反射も受けている可能性がある。

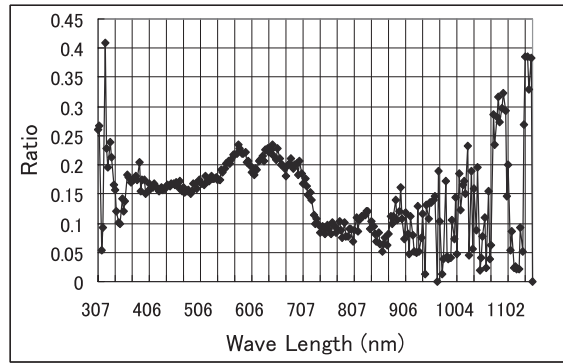


図6 深泥沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

3. 深泥沼

前述同様に深泥沼の測定を行い、深泥沼水面からの分光放射と白色板からの反射分光放射の比を求めたものが図6である。他の湖沼にはない顕著な2つのピークが出現している。すなわち、570 nm(橙色)と630 nm(赤色)の波長帯である。深泥を表す緑色系も相対的に大きい反射率を示している。しかし、近赤外領域の分光放射量は相対的に小さくなっている。これは湖沼がこの波長帯域を効率的に吸収しているためである。

4. 竜沼

竜沼の水面からの分光放射と白色板からの反射分光放射の比を示したのが図7である。相対的

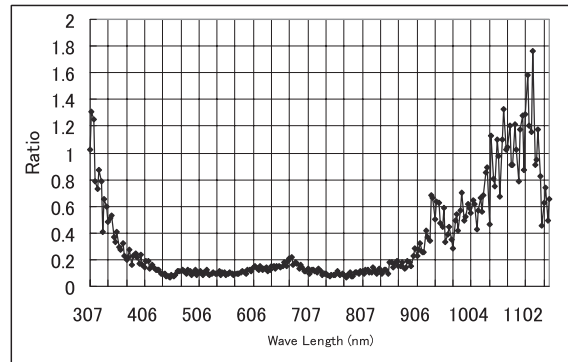


図7 竜沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

に370 nm以下の波長帯域と900 nm以上の波長帯域の比が大きい特徴を有している。また、670 nm(赤色)付近にも反射強度の大きい波長帯域がある。観測期間中台風通過の影響で比較的天気が変わりやすく、短い波長の卓越は天気が回復した時

に発生している可能性があり、天気によって水面の色が変化することと対応していると考えられる。また、900 nm 以上の波長帯域の放射が相対的に大きいのは、相対的に大きい径を有する散乱粒子が浮遊している可能性を示している。

5. 弁天沼

弁天沼の水面からの分光放射量と白色板からの反射分光放射量の波長毎の比を図 8 に示す。

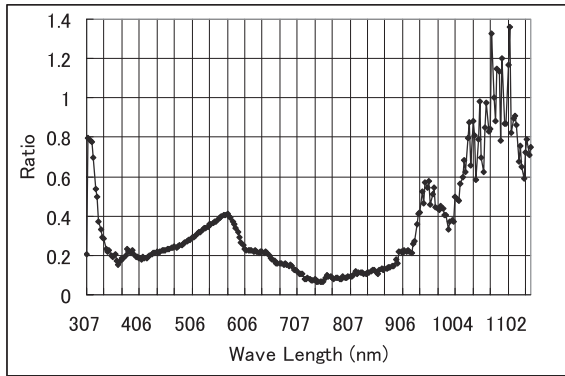


図 8 弁天沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

430 nm から 630 nm の帯域の比が相対的に大きく、特に、560 nm 付近の比が大きく緑色が卓越している。また、竜沼と同様紫から青色に相当する波長帯域の比も相対的に大きい。近赤外領域の比にも 950 nm 付近と 1120 nm 付近に大きな比が存在している。近赤外付近の反射強度は水色には直接関係しないが、前述の竜沼と類似している。

6. 柳沼

柳沼の水面からの分光放射量と白色板からの分光放射量との波長毎の比を図 9 に示す。柳沼は

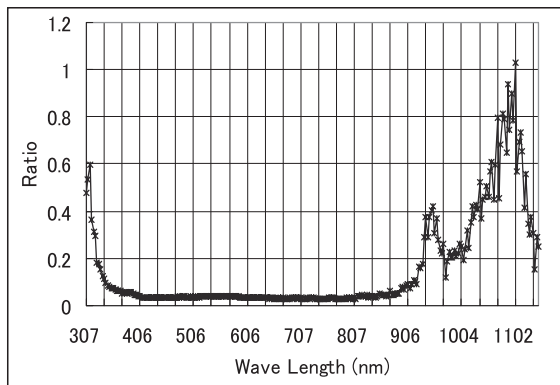


図 9 柳沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

330 nm 以下の波長と 900 nm 以上の波長帯域で相対的に大きい反射率を示すものの、色として認識する可視領域では白色板に対して 3%から 4%程度の比を示し、特徴的な散乱波長帯域は認められない。可視領域の小さい比の中でも相対的 570nm (橙色) 付近の波長域が卓越している。

7. 弥六沼

弥六沼の水面からの分光放射量と白色板から

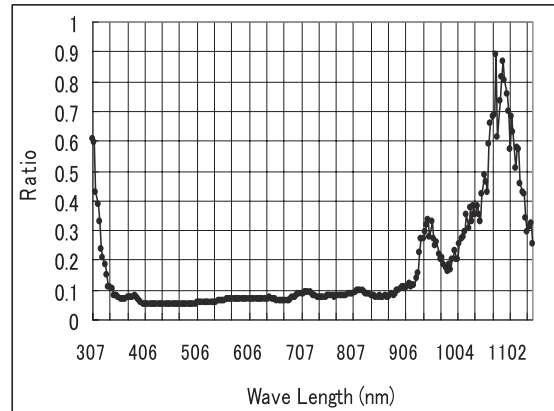


図 10 弥六沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

の分光放射量との波長毎の比を図 10 に示す。弥六沼では短波長から長波長にかけて次第に白色板に対する比が増加しており、相対的に赤色系が卓越している。なお 370 nm 付近にも僅かなピークが出現している。

8. 青沼

青沼の水面からの分光放射量と白色板からの分光放射量との波長毎の比を図 11 に示す。370

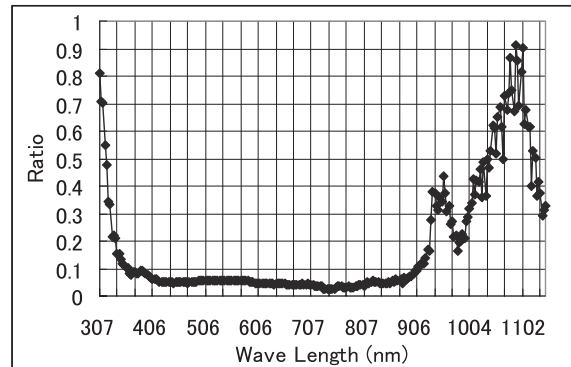


図 11 青沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

nm(紫色)付近に 10%を超えるピークが存在し、

青沼に対応する放射特性を示している。前述の弥六沼とは異なり、白色板との比は青系から赤系に向かって減少傾向を示している。これは相対的に青沼が名前のとおり青色に見えることと対応したものと考えられる。また、相対的にこれに対応した散乱粒子が青沼には存在するものと考えられる。

9. 瑠璃沼

瑠璃沼の水面からの分光放射量と白色板からの

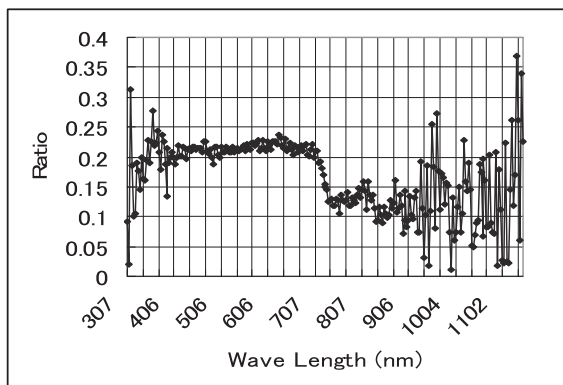


図 12 瑠璃沼と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

分光放射量との波長毎の比を図 12 に示す。瑠璃沼の水面からの分光放射量と白色板の反射分光放射量との比は類型別で見ると、深泥沼、赤沼と同様な比の分布状態を示し、近赤外領域の比よりも可視領域の比が相対的に大きくなっている。しかも同じ種類の属する 3 つの湖沼群の中でも可視領域の比率は最も大きい値を示している。可視光の中でも 370 nm(紫色)付近は 25%と最も大きい比を示している。正に湖沼の名称に対応する分光放射特性を示している。次いで 630 nm 付近の橙色から赤色も相対的に大きい値を示している。

IV. まとめ

裏磐梯湖沼群の水色の分光放射特性を明らかにするため、分光放射計を用いてその特性を計測した。ここでは、湖沼の散乱光を中心に可視領域の散乱光を対象とするため、入射光を 10° と湖沼水面からの散乱域を小さくして計測した。また、分光放射特性は太陽高度や天候に大きく影響されるこ

とから白色板を用いて、白色板との比を用いて放射特性を求めた。その結果、波長による分光放射特性として、可視領域の波長帯の白色板との比と近赤外の波長帯域の白色板との比で、可視領域の波長帯域の比が相対的に大きい湖沼群として、深泥沼、赤沼、瑠璃沼があり、近赤外の波長帯域の比が相対的に大きい湖沼群として、毘沙門沼、竜沼、弁天沼、柳沼、弥六沼、青沼があることが分かっ

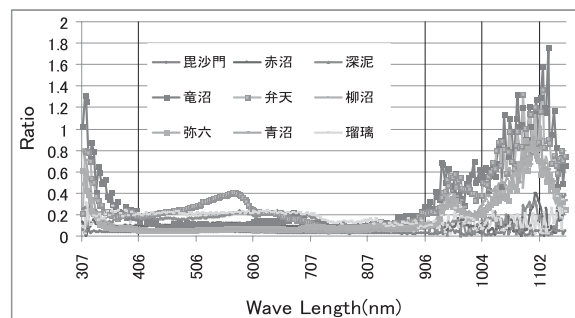


図 13 湖沼の水面と白色板との反射光の波長毎の分光放射量比

た。また、図 13 に全体の湖沼群の水面からの分光放射量と白色板の反射分光放射量の比を示したが、白色板との比の分布形態では、特に近赤外の比の大きさから竜沼、弁天沼に対して、次いで大きい比を示す青沼、弥六沼、柳沼、最も小さい瑠璃沼、深泥沼、赤沼、毘沙門沼と 3 つに区分された。また、波長帯域の放射特性としては可視領域の赤色系で 2 つのピークを持つ深泥沼、緑系が非常に卓越している弁天沼が分光放射特性として検出できた。

今後こうした分光放射特性が湖沼中のどのような物質に依存しているのか、あるいは天候等環境に依存しているのかを解明する必要があり、再度天候の安定した時に全体を計測する必要がある。

引用文献

- 岡見 登・岸野元彰・宮崎忠国 (1992) 霞ヶ浦湖水の分光反射率と水質, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.2, No.1, 21-31.
- 沖 一雄・安岡善文 (1996) 高濃度水域における

近赤外波長帯を含む二波長によるクロロフィル a 推定モデルの作成, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.16, N0.4, 1-9.

千葉 茂 (1989) 裏磐梯五色沼の水質と水色, 科学と教育, Vol.37, No.5, 42-45.

渡邊 明 (2012) 分光放射計を用いた水色の解析, 裏磐梯五色沼湖沼群の環境調査中間報告, 31-33.