

十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第二報) :

自作した吸収スペクトル測定装置のハードおよびソフトウェア

花石竜治 佐藤裕久

十二湖青池の呈色機構の研究に当たり、青池湖内の実地での吸収スペクトルを測定するために自作した測定装置について報告する。装置は、水面下となる受光部から光ファイバで「ミニ分光器」に光を導入し、「ミニ分光器」とマイコンボードを LAN ケーブルで結び、水面下の光吸収スペクトルデータを PC で観測することを可能とした。そのハードおよびソフトウェアについて述べ、実際の応用例を報告する。

Key words: Spectrometer, Aoike Pond, Absorption spectrum

1. 緒言

筆者らは、津軽国定公園内の十二湖青池の呈色機構を研究しており、2017 年度は、青池湖内での光吸収スペクトル測定を企図し、その測定機器を自作して、測定を行った。その結果を含んだ報告については、別途報告予定¹⁾³⁾であり、この装置を用いて得られた結果は、「青池湖内の光吸収と水そのものの光吸収は同じ」という、青池の呈色機構研究において鍵となる重要なものとなった。本報告では、その測定装置のハードおよびソフトウェア、応用例について報告する。

2. 方法

2.1 測定装置の構成に使用した部分品・装置

本研究で使用した分光器は浜松ホトニクス「ミニ分光器」C12880MA-10⁴⁾、光ファイバケーブルは同社 A9762-01 であった。「ミニ分光器」を制御するマイコンボード Arduino Uno は、Arduino SRL 社の製品

を用いた。「ミニ分光器」と Arduino Uno の制御・通信および自作装置の垂下を兼ねた LAN ケーブルは、岡野電線の 3.1 mm φ の製品を用いた。LAN ケーブルから、青池湖内に垂下するために使用した釣り竿として、全長 5.4 m の磯釣り遠投用を用いた。

クロック波形の観測は、EZ Digital 社のデジタルオシロスコープ DS-1100C を、RS-232C 経由で自作の Visual Basic によるプログラムで制御して行った。このオシロスコープは、帯域が 100 MHz であった。

2.2 機器の製作

(1) 測定装置の概要

図 1 に設計した測定装置の概念図を示す。「ミニ分光器」とマイコンボード Arduino Uno を LAN ケーブルで接続し、Arduino Uno を介して PC 上の Microsoft 社 Excel マクロにより制御した。



図 1 測定システムの概念図

(2) 測定装置のハードウェア

図 2 に自作した測定装置の画像のトレースを示した。

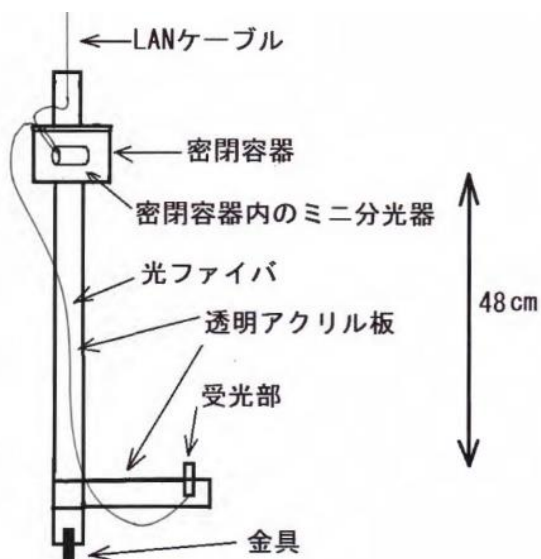


図 2 自作した測定装置の画像のトレース

「ミニ分光器」部が水面上に位置するように、かつ、受光部が水深約 50 cm となるようにして、二重に防水した容器に格納した。

なお、LAN ケーブルにより釣り竿から装置を垂下し、湖内水深 48 cm および湖面直上に位置させ、両者のスペクトルを採取した。

(3) 測定装置のソフトウェア

「ミニ分光器」制御の Arduino Uno の動作フローを図 3 に示した。

ノート PC 上の Excel マクロから、文字列 "s" を Arduino Uno のシリアルポートに送信すると、デジタル信号により、「ミニ分光器」がスペクトル採取を行い、Arduino Uno のシリアルポートに結果を出力して、それを PC 上の Excel マクロが Excel ワークシートにスペクトル値として取り入れるように設計した。

2.3 分光器出力値からの吸光係数のスペクトルの演算方法

「ミニ分光器」出力値の、波長 λ_i での湖内の光強度を $I(\lambda_i)$ 、湖面直上での光強度を $I_0(\lambda_i)$ とすると、これらは分光器の分光感度特性による波長依存の係数 $U(\lambda_i)$ も含み、純粋な光強度をそれぞれ $I'(\lambda_i)$ 、 $I'_0(\lambda_i)$ 、暗条件での出力値を $I_B(\lambda_i)$ とすれば、

$$\frac{I(\lambda_i) - I_B(\lambda_i)}{I_0(\lambda_i) - I_B(\lambda_i)} = \frac{I'(\lambda_i)U(\lambda_i)}{I'_0(\lambda_i)U(\lambda_i)} = \frac{I'(\lambda_i)}{I'_0(\lambda_i)}$$

となる。太陽光を利用して、湖内と湖面直上とで光測定を行い、スペクトルを得た。

測定対象としている吸収スペクトルに影響が少なく、比視感度が最大に近い 550 nm 付近のミニ分光器出力値との比を取り、それを 3 回繰り返して算術平均を取ってから光強度比とし、吸光係数を得るための対数変換へと移行した。比を取った後に算術平均を取ったのは、日光の経時的強弱変化を相殺するためであった。

吸光係数 $A(\lambda_i)$ の表式は、

$$A(\lambda_i) = -\frac{\log_e \left\{ \frac{I(\lambda_i) - I_B(\lambda_i)}{I_{550 \text{ nm}} - I_{B,550 \text{ nm}}} \cdot \frac{I_0(\lambda_i) - I_B(\lambda_i)}{I_{0,550 \text{ nm}} - I_{B,550 \text{ nm}}} \right\}}{L} \quad \dots (1)$$

ここで、 L は光路長であり、直達日射と散乱日射の場合^{5),6)}で扱いが異なる。また、分光器の 550 nm の出力値は、添え字に 550 nm と記している。暗条件は、実験室において受光部を黒布で覆うことにより設定した。

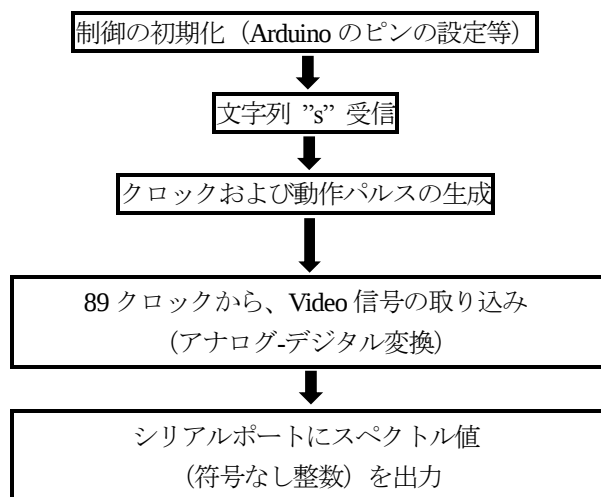


図 3 Arduino Uno の動作フロー

2.4 機器の運用

2017 年 7 月 5 日および 6 日に自作機器を用いた測定を行った。このときの日射の条件は「散乱日射」であった。

2.5 室内実験による光吸収スペクトル測定

紫外可視分光光度計である島津製作所 UV-1800 に光路長 10 cm の石英セルを装着し、同じ石英セルを空にして対照とした。青池の表層で採取しポリカーボネート製の瓶に入れ実験室へ輸送した湖水と超純水の吸収スペクトルを即日測定し、吸光係数を求めた。

3. 結果

3.1 LAN ケーブルで「ミニ分光器」と通信を行うことの適用性について

測定システムのクロックをオシロスコープにより観測したところ、周期が約 12.1 μs であり、クロッ

ク波形は、20 m の LAN ケーブルの末端で良好に On/Off が保たれていた。

よって、本研究の測定システムにおいて、デジタル信号が正確に伝わっていたことを確認できた。

3.2 測定装置の運用により得た生データおよびその演算過程

図 4 に 2017 年 7 月 6 日 11 時台の測定結果（「ミニ分光器」出力値から演算過程の強度比スペクトルまで）を示した。また図 5 に、図 4 の演算に必要な暗条件でのミニ分光器出力値を示した。

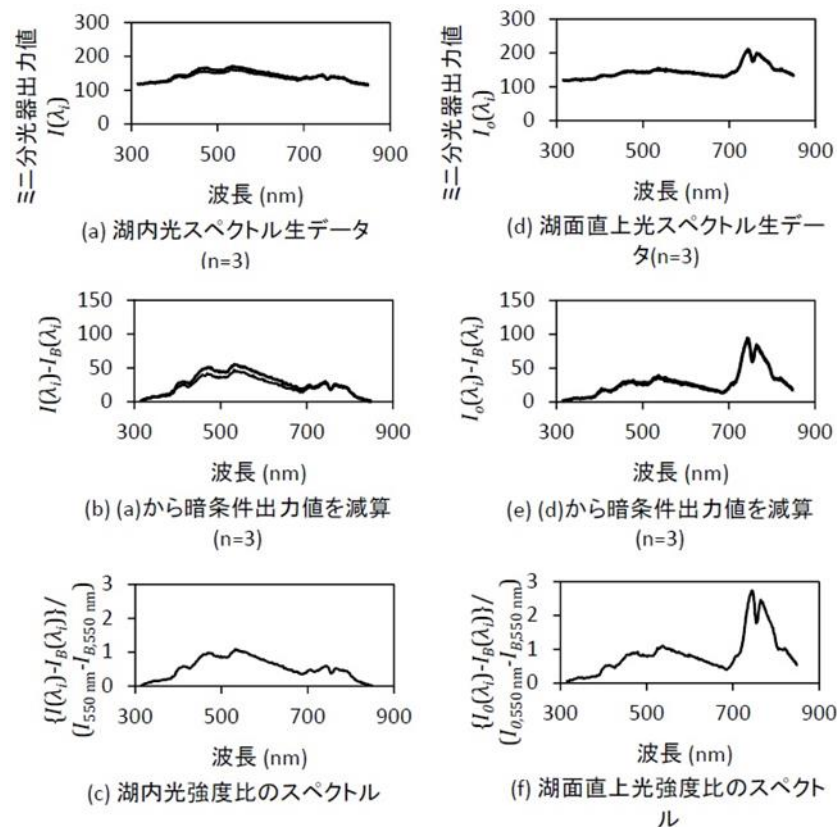


図 4 青池湖内および湖面直上における光スペクトル測定装置の生データ、演算過程のスペクトル

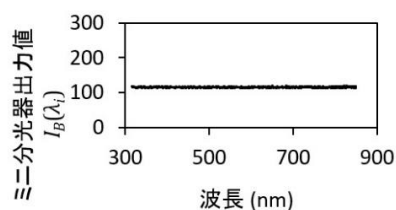


図 5 暗条件でのミニ分光器出力値
(図 4 の演算に使用)

3.3 自作装置により測定した青池実地の光吸収スペクトルおよび室内測定での光吸収スペクトルの比較

図 6 に、調査期間の 4 つの時刻での光吸収スペクトル測定で式 (1) および考察の項で述べる「散乱日射における光路長の仮定」によるスペクトル計算結果を示し、同日採水の青池湖水および超純水の吸収スペクトルを併記した。

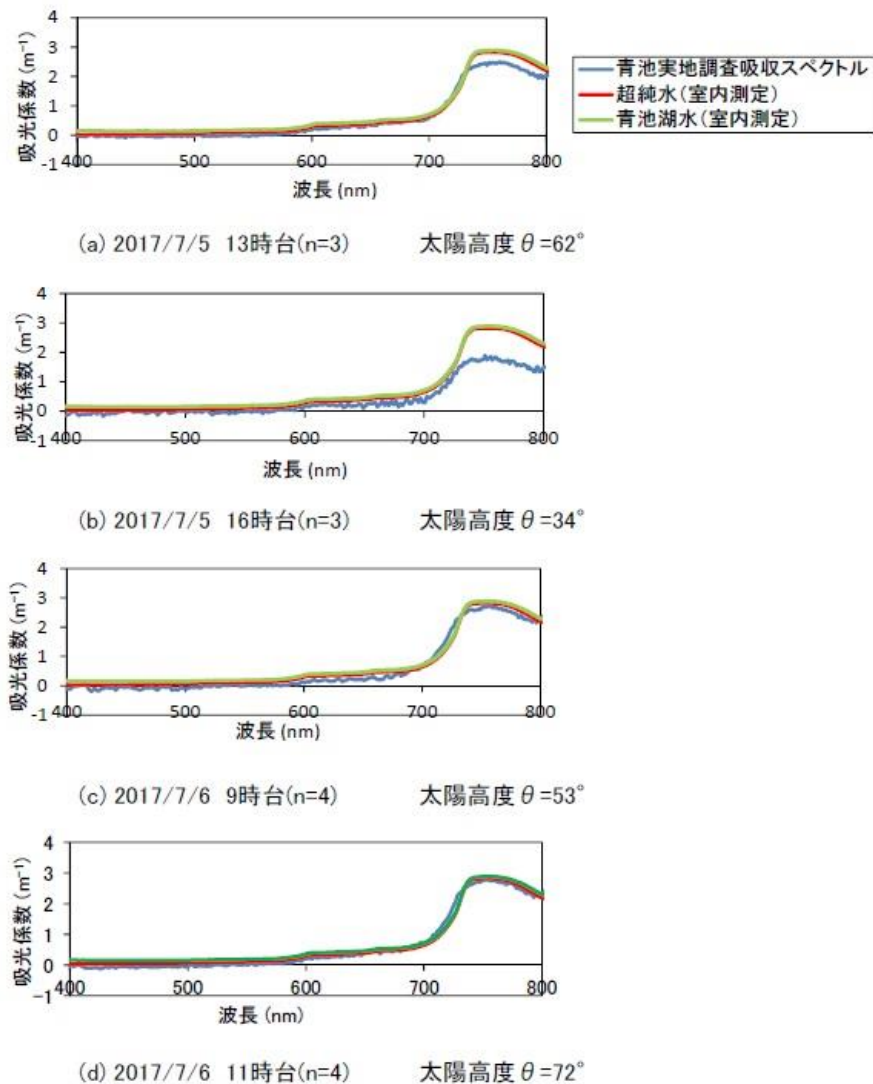


図6 自作した測定装置による2017年7月5日から7月6日にかけての4つの時間帯での青池実地での光吸収スペクトルと室内実験結果の比較

4. 考察

4.1 太陽高度の違いによる観測の有効性

式(1)には「光路長」が対数変換後の除数になっている。一方、技術資料によれば、受光部の光ファイバ先端は、有効受光角が $\pm 20^\circ$ と記述されている。

太陽からの日射は、「直達日射」と「散乱日射」とに分けられ^{5),6)}、放射が一方向由来か(前者)、全天由来か(後者)の違いがある。

今回の測定時は、散乱日射の条件であり、厳密には、有効受光角における立体角での強度の積分が必要となる。しかし、その有効受光角が狭いことと受光部が真上を向いていることから、放射光が真上から受光部に達し、その光路長は受光部を沈めた深さに等しいと仮定した(以下、「散乱日射における光路長の仮定」とする。)。この場合、フレネルの反射透過係数では、湖面反射光の強度がなくなり、真上か

らの光はすべて湖内に入射する⁷⁾⁹⁾。

図6に示したスペクトルで、太陽高度が高い場合(7月6日11時台)には、吸収係数が室内測定結果と一致している。一方、太陽高度が低い場合(例:7月5日16時台)には、吸収係数が室内測定結果の6割程度まで低下して観測された。

よって、この自作の測定機器で、前述の「散乱日射における光路長の仮定」を行う場合には、太陽高度が高い日時にのみ適用できると結論された。

4.2 太陽光のフラウンホーファー線の影響の相殺

図6の4つの時刻で共通していることは、スペクトルの生データの図4の波長760 nm付近の光強度の落ち込みが、演算処理後の、この図6の光吸収スペクトルでは表れていないことである。この波長760 nm付近においては、太陽光が大気中の酸素分子で吸

収され、暗線としてのブラウンホーファー線となるものと考えられている。これが青池実地での光吸収スペクトルに表れないのは、太陽光を利用したこの自作の測定機器で得た結果を演算する式 (1) の方法が正しいことを示す。

5. 結語

青池における実地の光吸収スペクトル測定のために自作した測定装置について報告した。

暗条件での出力値の減算、550 nm 付近の測定値に対する比率計算により、太陽高度が高いときに、青池実地で得た吸収スペクトルが、その湖水の室内吸収スペクトルと構造および強度が一致し、分光学的に、青池実地における湖内光吸収を明らかにできた。

この自作した測定装置は、太陽高度の高い日時のみ運用可能であるが、得られるデータはスペクトルであり、従来の3色カラーセンサー法と比べて、より詳細な情報を持つ実験結果を与えると考える。

以上に述べたハードおよびソフトウェアからなるこの自作装置は、湖沼の湖水中における光吸収スペクトル測定装置として有用と判断した。

文 献

- 1) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する化学分析および光測定による研究. 投稿準備中.
- 2) 花石竜治, 他: 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**, 56-61, 2017.
- 3) 花石竜治, 他: 十二湖青池の呈色機構に関する研究 (第四報): 青色呈色のシミュレーション. 投稿準備中.
- 4) 浜松ホトニクス C12880 技術資料.
- 5) 田中丸治哉, 他: 地域環境水文学 シリーズ地域環境工学. 朝倉書店, 東京, 2016.
- 6) 久米 篤, 他監訳: 生物環境物理学の基礎 第2版 (原著: Gaylon S. C. et al.: “An Introduction to Environmental Biophysics”, 2nd ed., 1997) , 森北出版, 東京, 2003.
- 7) 谷田貝豊彦: 光学. 朝倉書店, 東京, 2017.
- 8) 山口一郎: 応用光学 応用物理学シリーズ. 応用物理学会編, オーム社, 東京, 1998.
- 9) 鶴田匡夫: 応用光学 I 応用物理工学選書 1. 培風館, 東京, 1990.

Coloration mechanism of Aoike Pond in Lake Juniko (2nd report): hardware and software of a laboratory-built apparatus for measurements of absorption spectra

Ryuji Hanaishi, Hirohisa Sato

In the course of research on the coloration mechanism of Aoike Pond in Lake Juniko, we report a laboratory-built apparatus for measurements of absorption spectra inside Aoike Pond. The spectrometer allowed us to take underwater light absorption spectrum data on a PC by introducing the light from the underwater photoreceptor part into the “mini spectroscopy” through optical fibers and connecting the “mini spectroscopy” with the microprocessor board using a LAN cable. We describe the hardware and software of the spectrometer and report its practical applications.

Key words: Spectrometer, Aoike Pond, Absorption spectrum