

水中クロロフィル a 濃度の深さ分布モニタリング用 イメージング DIAL の開発

飯島 悠介, 阿保 真

東京都立大学大学院システムデザイン研究科(〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Development of Imaging DIAL for Depth Distribution Monitoring of Chlorophyll-a Concentration in Water

Yusuke IJIMA and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Changes in organic matter in lakes and oceans affect ecosystems and the natural environment. In particular, phytoplankton is located at the base of the ecological pyramid in the water, so understanding the amount of phytoplankton is essential to elucidate the structure of the ecosystem. Observing the vertical movement of phytoplankton in lakes will help to understand the generation mechanism of water pollution such as blue-green algae and its impact on water quality. At present, chlorophyll concentrations are obtained by chemical analysis of the collected water from lakes and marshes, but this is time consuming and laborious. There are reports of chlorophyll observations using fluorescence lidar, but it can only be measured at a night.

In this study, we propose imaging DIAL that enables continuous day and night observations. We evaluate the performance of the DIAL by indoor measurements and investigate the feasibility of the DIAL in the real environment.

Key Words: DIAL, Chlorophyll, Scheimpflug lidar, phytoplankton

1. はじめに

湖沼や海などの水域における有機物質の変化は、生態系や自然環境に影響を与える。特に植物プランクトンは、水中における生態ピラミッドの最下層に位置するため、植物プランクトンの量を把握することは、生態系の構造を解明するために必要不可欠である。水中の植物プランクトンは日周期的に鉛直運動することが分かっている。これは、効率的に光合成を行うため水面に移動する為や表層で欠乏したリンや二酸化炭素を求める為といわれている¹⁾²⁾。湖沼における植物プランクトンの鉛直運動を観測することで、アオコ等の水質汚染の発生メカニズムを解明するとともに、その水質に及ぼす影響を明らかにする手掛かりが得られる³⁾。しかし現状のクロロフィル濃度測定は、湖沼や海からサンプリングした水を化学的に分析する手法が主流であり、分析には時間と手間がかかる。蛍光ライダーを用いた水域環境調査の事例⁴⁾があるが、蛍光ライダーは太陽光の影響を受けるため測定が夜間に限定される。

本研究では、日中でも連続的な観測が可能であるイメージング DIAL (Differential Absorption Lidar) によるクロロフィル濃度の遠隔測定法を提案する。また実際に水槽を用いた屋内測定実験を行い、その性能評価と実環境での測定可能性を検討した。

2. 水中クロロフィル濃度の遠隔測定手段の提案

2.1 差分吸収ライダー (DIAL) の原理

DIAL は測定対象による光吸収の波長依存性を利用し、受信強度の差異を解析することで濃度分布を導出できる。吸収が強い on 波長と吸収が弱い off 波長におけるライダー方程式から、距離 r における平均濃度 $n(r)$ は以下の式で表すことができる⁵⁾。

$$n(r) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dr} \ln \frac{P_{on}(r)}{P_{off}(r)} + \frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{d}{dr} \ln \frac{\beta_{on}(r)}{\beta_{off}(r)} - \frac{\Delta\alpha}{\Delta\sigma} \quad (1)$$

ここで、添字 on, off はそれぞれ on 波長と off 波長、 $\Delta\sigma$ は on 波長と off 波長の測定対象の吸収断面積の差、 $\Delta\alpha$ は on 波長と off 波長の測定対象以外の物質の吸光係数の差、 P は受信信号強度、 β は後方散乱係数である。第 2 項並びに第 3 項は補正項と呼ばれ、必要に応じて補正が必要となる。

2.2 イメージングライダー

イメージングライダーは、レーザ光によって散乱した散乱光跡を離れた位置からカメラで撮影し、画像処理により散乱光強度の距離分布を得る装置である。本研究では多重散乱の影響も想定されることから、シャインプルフ (Scheimpflug) の原理 (イメージセンサ面、レンズ主面、物体面が同一線上で交わるように配置すると、近距離から遠距離まで同時にカメラの焦点を合わせることができる)⁶⁾ を適用したイメージング DIAL を設計した。

2.3 波長の選定

DIAL で用いる on 波長と off 波長を選定する。植物プランクトンの定量測定では、クロロフィル a 濃度が指標として用いられており、クロロフィル a の量を測定することで植物プランクトンの相対的な量を推定することが出来る。波長を選択する際には、クロロフィル a の吸収特性だけでなく、水による吸収や、CDOM（有色溶存有機物）やトリプトン（非生物粒状物）などの他の物質の吸収も考慮する必要がある。

Fig.1 はアオコが観測された東京湾（クロロフィル濃度 80 $\mu\text{g/L}$ ）で測定されたクロロフィル a と水の吸光係数の波長特性である。クロロフィル a は青色光領域と赤色光領域で強い吸収を示すため、この領域から波長を選択するのが望ましい。しかし赤色光領域では水の吸収が大きくなり、例えば波長 675nm の場合深さ 1m でおよそ 60%減衰する（ランベルト・ベールの法則）。そのため、水の吸収の影響が少ない 600nm 以下から波長選択するのが望ましい。

まず、ライダーで広く利用されている 532nm を波長の 1 つとして選択した。もうひとつの波長の選択するにあたり、その他の物質の吸収の影響を考慮する必要がある。Fig.2 に、クロロフィル a とその他の物質（CDOM、トリプトン）の各波長における吸光係数と 532nm における吸光係数との差分を示す。クロロフィル a の吸光係数の差分がその他と比較して倍以上あることが望ましく、その波長の中から十分な出力が得られる半導体レーザーが入手可能な 515nm を選択した。その他の物質の影響は補正を全く行わないと最大 30% 程度の影響があるが、クロロフィルメータなどによる実測により一定程度の補正は可能であると考えられる。

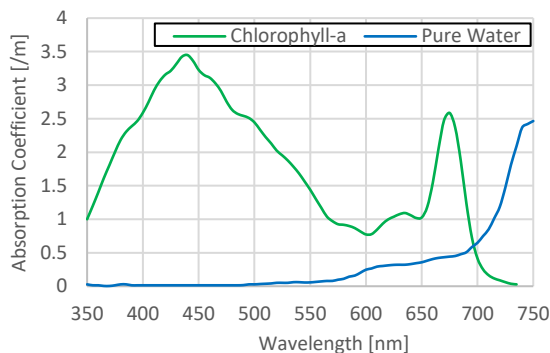


Fig. 1 Spectra of the absorption coefficients of Chlorophyll-a (80 $\mu\text{g/L}$) and water.

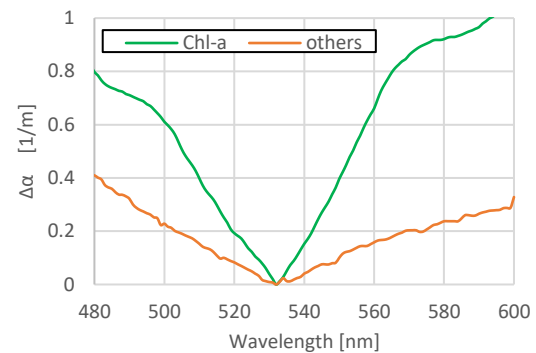


Fig. 2 Difference in absorption coefficients at each wavelength and at 532 nm for chlorophyll a and other substances (CDOM, tryptone)..

3. 屋内実験

3.1. 装置の設計と実験方法

Table.1 に屋内実験で用いた水中クロロフィルイメージング DIAL の仕様、Table.2 に DIAL の設定パラメータ、Fig.3 に実験装置の概略図を示す。DIAL は文献 8 を参考に、奥行き 90cm のアクリル水槽が十分に撮影できるように角度を調整した。測定はアクリル水槽に水を入れ波長を切り換えながらレーザーを照射し、照射方向から水中散乱光を撮影する。その際、背景光の画像、水のみ散乱光画像、各濃度のクロロフィルの On/Off 各波長の散乱光画像を取得する。クロロフィルの濃度調整は、クロレラ粉末を水に溶かすことで行い、濃度が水槽内で一定となるように良く攪拌した。クロロフィル濃度は、濃度を変える毎にクロロフィルメータ（CHL-5Z：笠原理化工業）を用いて測定した。露光時間はカメラの輝度値が飽和することなく高い S/N 比が得られるよう濃度毎に設定し、ノイズ低減のために各測定において 50 枚の画像を連続で取得した。

Table. 1 Hardware specifications of the imaging DIAL

On Laser(515nm)	L520P50(Thorlabs) Output Power : 30mW
Off Laser(532nm)	DJ532-40(Thorlabs) Output Power : 30mW
CMOS Camera	CS165MU1(Thorlabs) Imaging Area : 4.968mm $\times$ 3.726mm Pixel Size : 3.45 μm $\times$ 3.45 μm
Lens	AC254-100-A-ML(Thorlabs) Focal Length : 100mm
Filter	#87-789 (Edmund Optics) Center Wavelength : 525nm FWHM : 25nm

Table. 2 Design value of the imaging DIAL experiment

Tilt angle of the image plane to the lens plane	$\Theta=45^\circ$
Swing angle of lens	$\Phi=3^\circ$
Distance of the lens from the object plane	L=105mm
Distance to aquarium	1.27m
Size of acrylic aquarium	W90 $\times$ D22 $\times$ H30cm

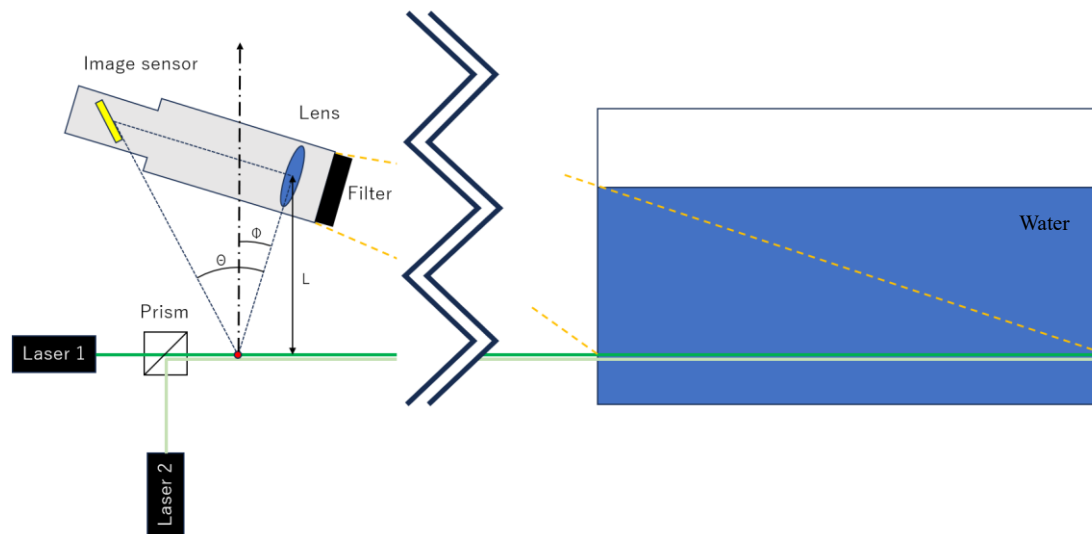


Fig. 3 Schematic diagram of the imaging DIAL (Scheimpflug lidar) experimental setup for measuring Chlorophyll-a in water.

3.2. 実験結果

屋内実験で得られた画像の一例（クロロフィル a 濃度 $36.1\mu\text{g/L}$ ）を Fig.4 に示す。画像は散乱光跡の写っている部分を切り出している。取得した 50 枚の各画像から、事前に撮影した水のための散乱光画像を差し引くことで背景光除去を行い、処理した輝度値を加算することで S/N 比を向上させている。レーザの始端と終端は、アクリル面での反射の影響により輝度値が増加している。また図の左に、計算により求めた距離目盛を記している。

(a)が on 波長の画像、(b)が off 波長の画像であり、on 波長の方がクロロフィルの吸収が強いので、減衰により下端 2m 付近の輝度値が off 波長に比べて下がっている様子が画像上でも確認できる。

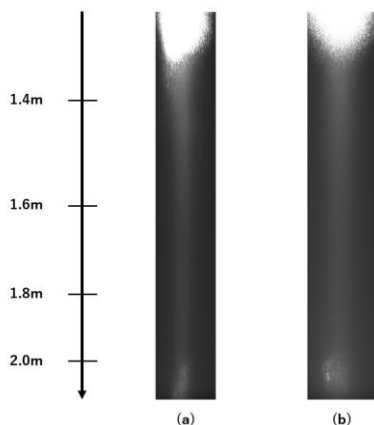


Fig. 4 Images of the imaging DIAL (a) on wavelength, (b) off wavelength (Chlorophyll-a concentration: $36.1\mu\text{g/L}$).

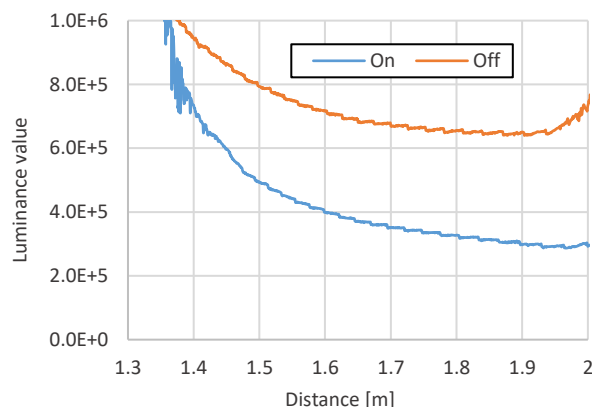


Fig. 5 Accumulated luminance value of the imaging DIAL versus distance (Chlorophyll-a concentration: $36.1\mu\text{g/L}$).

3.3. 解析結果

背景光除去を行い加算した各波長の画像、多重散乱の影響を除去するためレーザビーム幅領域を切り出し、各列の輝度値を積算することで、散乱光強度を取得する。Fig.5 に、Fig.4 の画像から求めた輝度値の距離特性を示す。On 波長が off 波長と比べて吸収が大きいことが確認できる。

次に各濃度毎に on 波長信号と off 波長信号の強度比の対数を距離に対してプロットした図を Fig.6 に示す。水中のクロロフィル濃度が均一であれば、このグラフは距離に対して直線的に増加し、傾きが吸光係数になる。低濃度の範囲では濃度と傾きに比例関係が見られるが、濃度が上がるにつれ傾きが小さくなってしまっている。これは、レーザの出力が不十分で、濃度が大きくなり吸収が大きくなり十分な散乱光が得られず、相対的に多重散乱光の影響を受けているためと考えられる。

Fig.7 に Fig.6 の距離 1.5~1.8m の区間の直線近似で求めた傾きとクロロフィル a 濃度の相関図を示す。両者の間には高

い相関が見られ、イメージング DIAL により水深 50cm のクロロフィル a 濃度が 10~90 $\mu\text{g/L}$ の範囲で十分測定可能である事が確認出来た。

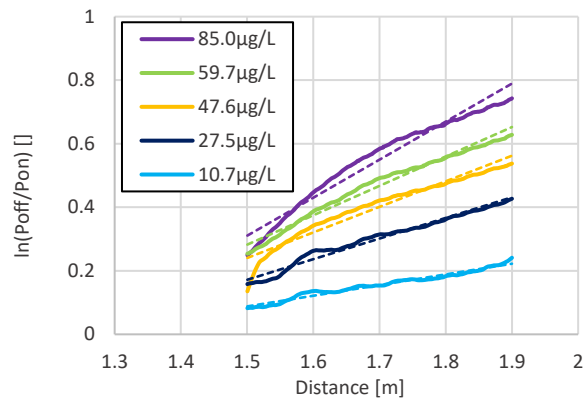


Fig. 6 Logarithm of $P_{\text{off}}/P_{\text{on}}$ versus distance for each Chlorophyll-a concentration.

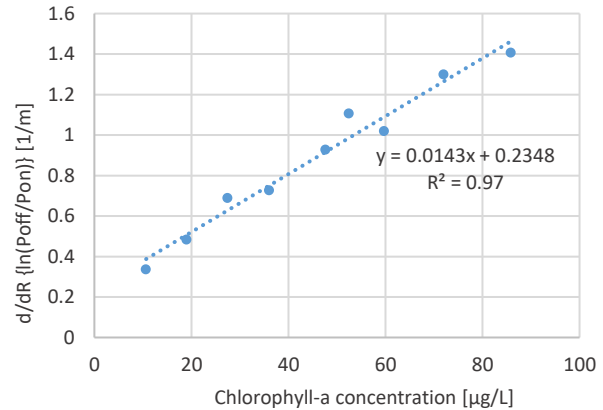


Fig. 7 Relationship between absorbance and Chlorophyll-a concentration.

4. まとめ

本研究では、水中クロロフィル濃度の深さ分布の測定方法の検討を行い、イメージング DIAL による手法を提案した。水槽を用いた屋内実験により on, off 2 波長の深さに対する散乱信号強度比から減衰係数を求め、クロロフィルメータの計測値と良い相関があることが確認出来た。今後は散乱係数や多重散乱の影響を考慮した解析を行うとともに、クロロフィル濃度に濃淡がある状況下での実験を行う予定である。さらに測定誤差を見積、必要なレーザ出力や受信光学系の検討を行い、屋外での測定に向けた検討を行っていく。

参考文献

- 1) M. Watanabe et al.: Limnology and Oceanography, **40** (1995) 1447.
- 2) 中野伸一他: アオコってなに? -ラン藻の大発生についてもっと知るために-, 京都大学生態学研究センター(2012).
- 3) 徳永貴久他: 土木学会論文集 B2, **77** (2021) 55.
- 4) 高野健悟他: 第 24 回レーザセンシングシンポジウム P-3 (2005).
- 5) 阿保真: 日本赤外線学会誌 **30** (2021) 34.
- 6) M. Brydegaard et al.: Proc. of SPIE **10406** (2017) 104060I.
- 7) 比嘉紘士: 沿岸域における衛星リモートセンシングのためのクロロフィル a・SS 同時推定手法の開発, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文(2011).
- 8) H. Zhang et al.: Remote Sens. **23** (2021) 2390.