

水中浮遊物質の鉛直分布計測のための バイスタティックイメージングライダーの室内実験

阿保 真, 清水 匡

首都大学東京 システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Laboratory Experiments of Bistatic Imaging Lidar for the Vertical Distribution Measurement of Suspended Matter in the Water

Makoto ABO and Tasuku SHIMIZU

Tokyo Metropolitan University, 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: Water quality of Japanese sea and rivers is improved, but the water quality variation and the ecological system are not well known. In this study, we propose the bistatic imaging lidar for the vertical distribution measurement of suspended matter in the water. This system can measure a stream of polluted water and make clear this mechanism. We show the feasibility of this lidar system by simulation and laboratory experiments.

Key Words: bistatic lidar, imaging lidar, water environment, suspended matter

1. はじめに

1970年代までの日本では工場排水や生活排水により河川や海の水環境や生態系が破壊されてきたが、各種規制や処理技術の進歩により近年は大きく改善され、昔の水環境に戻すための活動も盛んに行われている。東京湾では東京湾再生推進会議を中心に水環境を再生する取り組みが行われている。しかし、水質形成環境や生態系については不明な点が多く、海洋モニタリングの必要性が指摘されている¹⁾。

河川と海の境目では河川からの流入と、海からの湧昇流と呼ばれる深層から表層への湧き上がりにより水面と水底の環境が異なっている。そのため、この領域での鉛直分布測定は環境動態解明の為に特に重要であるが、未だ十分な情報が得られていない。汚れの流れや二次変化の計測が可能になれば、汚染問題の改善策を提案することが可能となる。

本研究では、東京湾の港湾区域の計測を想定し、距離分解能 30cm で水深 10m までの水中浮遊物質濃度の鉛直分布を高頻度・連続に計測可能な新しいライダーを提案する。はじめに新しい水中計測用バイスタティックイメージングライダーの基本式を提案し、次にシミュレーションと基礎実験によりその有用性を示す。

2. 水中バイスタティックイメージングライダー

水中の鉛直分布を計測するライダーとして、パルスレーザーを用いたモノスタティック方式と送信部と受信部を離して用いるバイスタティック方式の二通りが考えられる。距離分解能 30cm を想定した場合、モノスタティック方式ではパルス幅が 2ns 以下のレーザーが必要となるため、今回は CW レーザーの利用が可能なバイスタティック法を採用した。

2.1 水中バイスタティックイメージングライダー方程式

提案するライダーシステムの水の外から見た光路図を Fig.1 に示す。深さ d からの受信光強度 $P(d)$ を

求めるバイスタティックライダー方程式は次式で表せる。

$$P(d) = P_0 \eta_0 \Delta r_{las}' A_R \frac{\beta(d)}{r'^2} T \exp[-(\tau_{sca}(d) + \tau_{las}(d))] \quad (1)$$

ここで、 P_0 は送信レーザーのエネルギー、 η_0 はライダーシステムの光学的効率、 $\Delta r_{las}'$ は見かけのレーザー光線上の距離分解能 (Fig.1)、 A_R はカメラレンズの有効受光面積、 $\beta(d)$ は水の体積散乱係数、 r' は見かけの散乱点から受信点までの距離、 T は水面での透過率 (入射時と出射時の透過率の積)、 $\tau_{sca}(d)$ 、 $\tau_{las}(d)$ はそれぞれ散乱光とレーザー光に対する水の光学的厚さである。

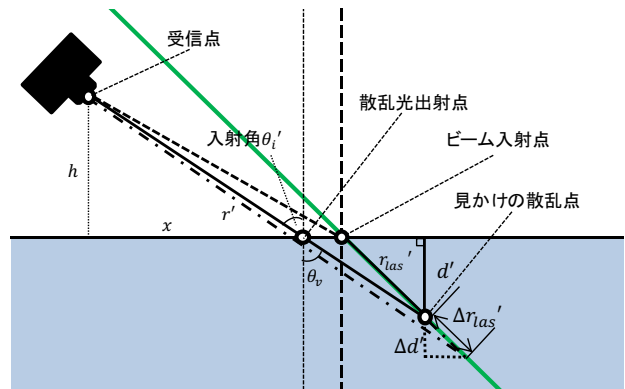


Fig.1 Light path of the bistatic imaging lidar system viewed from outside the water.

2.2 測定可能性のシミュレーション

夜間での測定を想定し、Table 1 に示すライダーの仕様と現実的な水の浮遊物質濃度を想定した減衰係数と後方散乱係数で水深 10m までの受信光子数を計算し、検出光強度から実測可能性について検討を行った。シミュレーション結果から、少し汚れた状態での水の減衰係数 0.4m^{-1} において、深さ 1m

～10m の受信信号のダイナミックレンジは 4 桁であり、フォトン数で 10^3 個まで検出できる撮像装置であれば計測が可能であることが分かった。

Table 1. Parameters of of the bistatic imaging lidar system

Laser Wavelength	532nm
Laser Power	60mW
Optical Efficiency	0.05
Effective Area of Camera Lens	50mm ²
F-Number of Camera Lens	2.5
Exposure Time	0.125s
Attenuation Coefficient of Water	0.1, 0.4, 1.0m ⁻¹
Backscattering Coefficient of Water	0.01, 0.04, 0.1m ⁻¹

3. 室内実験

実際の屋外での測定を約 10 分の 1 にスケールダウンした室内実験装置を、ポリタンク(胴径Φ586mm×全高978mm)を用いて設計・製作し、デジタルカメラを用いて輝度データを取得する実験を行った。実験の様子を Fig.2 に示す。取得した輝度データに距離二乗、距離分解能、散乱角度依存性、透過率の各補正を行い、対数変換を行った後に最小二乗法によるスロープ法を用いて減衰係数を推定した。

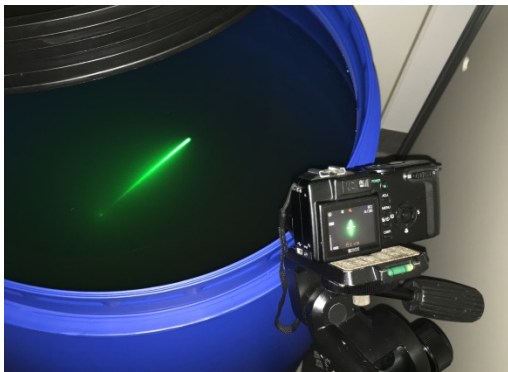


Fig.2 Photo of laboratory experiment of the bistatic lidar.

始めに水道水を用いて測定した輝度値の補正済信号と減衰係数の推定結果を Fig.3 に示す。推定された値は蒸留水の減衰係数の文献値 (0.05 m^{-1}) とよく一致した²⁾。

次にスキムミルクを水に溶かし薄い白濁状態の水の減衰係数を推定する実験を行った。結果を Fig.4 に示す。推定した減衰係数の値 (2.0 m^{-1}) は別途透過率測定から求めた値 (2.2 m^{-1}) とほぼ一致した。しかし水深により傾きが異なるため、20 点ずつ部分的にフィッティングを行い、深さごとの減衰係数を求めた結果を Fig.5 に示す。浅い方の減衰係数が低い値となった。これはスキムミルクがタンク内で十分攪拌されずに底の方が濃い不均一状態になっていたためと推定され、このような深さ方向の不均一分布測定に成功したと考えられる。

4. まとめ

本研究では水中浮遊物質の汚れの鉛直分布を計測するバイスタティックイメージングライダーシ

ステムを設計した。室内実験において水道水及び混濁水において深さ 0.8m、減衰係数 2.0 m^{-1} までの深さ分布測定が可能であることを示した。これは深さ 10m に換算すると 0.2 m^{-1} までの測定が可能であることになる。今後は屋外での測定を実現するために、①昼間観測における背景光の影響、②風や波による影響を評価しその対策を考えていく必要がある。

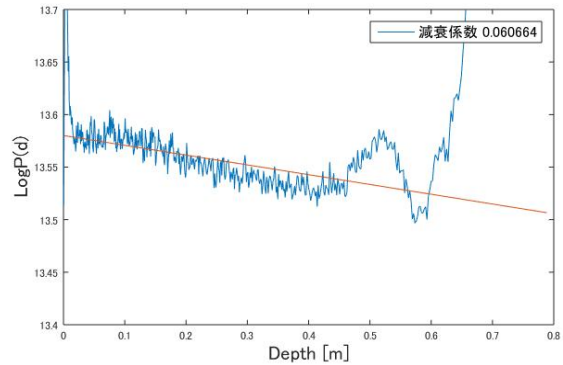


Fig.3 Corrected luminance value and estimated attenuation coefficient for tap water in the tank.

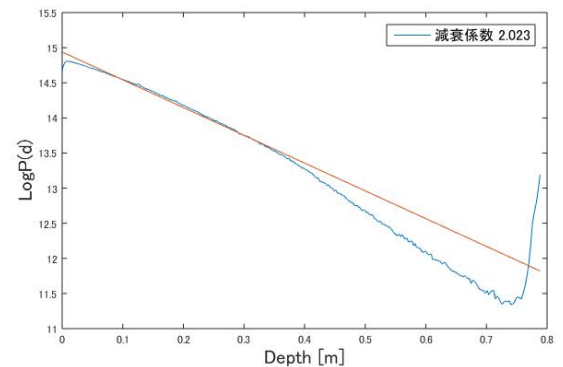


Fig.4 Corrected luminance value and estimated attenuation coefficient for impure water in the tank.

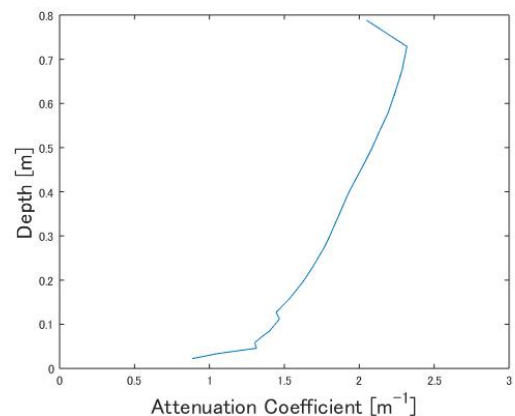


Fig.5 Depth distribution of attenuation coefficient in the tank obtained from the data of Fig.4.

参考文献

- 1) 東京湾再生推進会議：東京湾再生のための行動計画(第一期)期末報告書, 2013.
- 2) C. Raymond et al: Appl. Opt., **20** (1981) 177.