

蛍光ライダー水域観測における背景光の影響

Effects of Background Radiance on the Performance of Oceanic Fluorescence Lidar

山岸進、樋富和夫、山之内博、田口昇、山口良隆

Susumu YAMAGISHI*, Kazuo HITOMI, Hiroshi YAMANOUCHI,

Noboru TAGUCHI and Yoshitaka YAMAGUCHI

海上技術安全研究所

National Maritime Research Institute

Abstract: The surveillance is an essential matter of oil spill response for providing helpful data to clean-up operation sites, and also for ordinary monitoring of marine environments. A compact fluorescence lidar system developed in our laboratory can provide a real time image of a spot on the water surface with an accurate positioning on a map. This paper describes effects of the background radiance including influences of waves on the measurements.

1. まえがき

油や有害液体物質の流出事故による大規模環境汚染の反省から、防除作業には成分を識別して昼夜の別なく、水面下も追跡できる監視技術が必要とされている。蛍光ライダーはこれに応える有力な方法であるが、海洋観測用の大型航空機に搭載したものがほとんどであり、汚染防除現場では活用されていなかった。そのためリアルタイム画像で汚染を監視する小型蛍光ライダーの開発を行っている。

ライダーを用いた海洋生物活性度の観測¹⁾や水面³⁾・水中探査の研究⁷⁾が行われているが、水質は多様であり、光の減衰も大きく困難が多い。受光器で検知される光は、大気中での散乱、水面で反射、水中での散乱、水底からの散乱の総和である。これらを求めるには、微粒子による散乱、波浪、水のラマン散乱、蛍光放射、更に、実際の観測に当たっては水域の特性についても検討が必要とされる。

本システムは、昼間、自然光による広角画像と信号スポットを同時に観測し、汚染対象を実時間で追跡しようとするものであり、背景光と信号強度に及ぼす影響に要因に検討した。

2. 実験

2.1. 蛍光ライダー²⁾

システムは、パルス YAG レーザ、ゲート付 II (image intensifier)、CCD カメラ及び PC から構成され、広角画面上にレーザ照射スポットを観測するものである。(Table 1) プロトタイプの飛行実験を日本海と琵琶湖上空で行った。ビーチクラフト機で高度 1000ft を速度 140knot で飛行し、真下に見るレーザ照射水面の画像 (Fig. 1) をショット毎に取得し、同時に GPS 信号を記録して、地図上に観測位置をプロットした。成分識別は、狭帯域スペクトルフィルタとゲート操作を用いて蛍光情報を得て、別途用意した蛍光成分データベースと比較参照して行う。これらの操作は、背景光除去と相反する面がありターゲットに応じて最適な調整をとる必要があり、工夫が必要な点である。

2.2. 最大値の算出

レーザビームの広がりには 3mrad. で、照射面積は水面上で直径約 0.9m、画像で直径約 25pixel に相当する。画像中の最大値は分散して現れるためレーザ信号の取得点の近傍(50x50 pixel)を対象に統計的処理を行って最大値を決定した。また、信号の背景光強度とその標準偏差は、信号に隣接したレーザ信号の影響を受けない領域で同様に統計的代表的値として求めた。Fig.2 はこのようにして得た信号の最大値と、近傍の背景光平均値と標準偏差値である。

2.3. 受光系の感度校正：

取得画像から水面の放射輝度を求めるには、受光系の感度校正データが必要である。このため CCD 画像素子について、He-Ne と分散型フィルタを使って受光系の感度を校正した。スポット画像の強度分布を正規分布曲線で近似して、その積分値をもってパワーメータ計測値と対応させた。本システ

ムの素子は約 $1.1 \times 10^{-8} \text{W/pixel/count}$ であった。これは観測対象の放射強度の絶対値を示すものではないがシステムの基準として重要である。

3. 受信信号

3.1. 受信エネルギー

ライダーの受信エネルギーは、次の式で与えられる。

$$E(\lambda, R) = E_L K_0(\lambda) T(R_0) \xi(R_0) \frac{A_0}{4\pi R^2} F(\lambda, \lambda_l) \quad (1)$$

ここで、 E_L はレーザエネルギー、 K_0 はフィルター関数、 T は大気減衰、 ξ は装置光学特性、 A_0 は受光面積、 R はターゲットまでの距離、 R_0 は大気中の距離、 λ は波長、添え字 l はレーザ波長、 F は励起効率である。受光エネルギーは受光パワーをゲート開放時間、即ち受光時間で積分したものであり、レーザのエネルギーは受光時間内の積分値である。ゲート幅と信号の時間履歴は非常に重要である。

大気減衰の項は、高度約 300m からの観測では小さいが、霧や飛沫の多い場合は考慮しなければならない。水中での光減衰は波長によって大きく異なり、紫外光の透過は約 10m 程度と言われている。また、懸濁度によっても大きな影響を受ける。水底からの信号は浅い場合に限りて考慮すれば良い。

3.2. 信号強度

レーザにより励起される信号強度は、レーザ (L)、受光系 (H)、信号光発生と水面と受光面間の幾何学的状態 (P)、光の水中減衰 (W) の効果のコンボリューションで与えられる^{1,3)}。光が水面へ入射する場合、その透過と反射は入射角度によって影響を受ける。その影響は光が空気から水へ入射する場合は 60° 以上、水から空気の場合は 30° 以上になると反射が急激に大きくなる。飛行機で真下を観測する場合はその影響は小さい。光の入射効率は平均水面からの距離と波面の傾斜角によって変化し、通常の風浪の傾斜は $1/7 \sim 2/7$ と報告されている。ここでは、波面の頂部と底部の傾きがゼロの所で信号が受信されると仮定して、波面と受光面の幾何学的関係の影響を波高と波面傾斜の分布関数の積で表す。また、波高と波面傾斜の分布形状は風速によって影響を受けると考える。

レーザと受光系については、レーザ波形と受光系の応答を正規分布でモデル化し、システムの応答はそのコンボリューションで与えられる。このパラメータは実験的にレーザ光の反射プロファイルから求めることができる。また、光の水中減衰項はつぎの関係で表すことができる。

$$\tau = n/2c(\gamma_e + \gamma_r) \quad (2)$$

ここで、 n は屈折率、 γ は減衰率で、添え字 e はレーザ、 r はラマン光の減衰を示す。

いま、対象信号として水からのラマン散乱光を考えると、波形は近似的に次式で表すことができる。

$$R = L * H * P * W = A \exp(-t/\tau) \exp(\sigma^2/\tau^2) \left\{ 1 + \text{erf} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{t}{\sigma} - \frac{\sigma}{\tau} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

ここで、 R はラマン波形、 A は $= 1/c \pi S^2$ を表す。ただし S^2 は波面傾斜の自乗平均である。 σ は受光システムと波高値の rms 値、 t は時間、 erf は誤差関数を示す。

S^2 は W を風速とすれば、5m/s 以下の場合次のように与えられることが報告されている。

$$S^2 = 0.003 + 0.005W \quad (4)$$

計算結果から次のことが推察される。波面傾斜と波高は風速の関数として表すことができ、これはレーザの時間幅とともに σ を介して信号波形に影響する。風速が大きく、モデルの分散値が大きくなると信号強度は低下する。水による光減衰が大きいと信号強度が小さくなり、減衰が小さいと信号強度は高まるとともにピークは時間的に遅れる。これは、光の到達距離の増加とともに水中からのラマン光の寄与が大きくなるためである。Fig.3 は光の減衰の波形に及ぼす影響を示した計算結果である。

4. 背景光

4.1. 天空の輝度

太陽光の水面反射は高度と観測角度によって決まるが、強い反射が直接観測される角度は太陽運行面約 20° の範囲に限られている。飛行機による観測方向は真下 (0°) であり、典型的な条件⁶⁾ (天空の輝度を $f_s=0.3$ とした時) において、水面直上で約 $0.08\sim 0.07 \text{ W/m}^2/\text{sr}^{-1}/\text{nm}^{-1}$ である。

4.2. CDOM(Chromophoric Dissolved Organic Matter)⁴⁾ とラマン散乱

海水を YAG レーザの THG で励起すると、450nm 付近にピークを持つ幅広い連続的なスペクトルが観測される。海水に含まれている物質の蛍光は、紫外から近赤外までの広い波長範囲の発光であり、水のラマン光を観測する際、大きな妨害となる。その強度は海水の採取地点によって異なるため基礎的な資料の蓄積が必要である。例えば、高知沖の海水では水のラマン信号は明瞭であるが、東京湾の海水では CDOM のピークに埋もれて微かなピークとなる。

4.3. ゲート操作と背景光

本システムで、自然光による背景画像と信号スポットを同時に観測するには、数 $\mu \text{ sec}$ 以下のゲート開放操作で可能となる。ゲート操作は、レーザ光の水面到達時期にタイミングを合わせてゲート開放するものであり、短いゲート幅を用いるにはこの精度高くしなければならない。しかし、飛行機中は姿勢と高度が変動するため精度に限界が生ずる。Fig.2 はゲート幅 100ns に設定して観測したものであるが、20ns に狭めて測定 (Number31~47) すると信号は弱まっている。

両者の背景光強度を比較すると、その平均値の差は(1 count 以下)で標準偏差(1.3 count)以内である。従って、信号強度の低下はゲート開放時間内に水面の信号を十分捉えていないことが原因と考えられ、工夫が必要な点である。

5. まとめ

小型軽量な蛍光ライダーを開発し、飛行実験で広角背景と同時に水面のレーザスポットを実時間表示し、同時に GPS データ記録を基に、計測位置を地図上にプロットした。

ゲート操作により背景光を調整し、信号を画像表示することは有効である。しかし、飛行機の高度・姿勢の変動のためタイミング精度に限界があり、約 20ns 以下のゲート操作は困難であった。

背景光強度について実験・調査の結果、ゲート時間操作の精度向上、受信感度と背景光の評価、成分の LIF データと海水の CDOM 資料集積を進める必要がある。

さらに、信号発生について、レーザと受光系の応答、風浪、光の水中減衰の観測波形に及ぼす影響をモデルで数量的に検討した。これらの効果を実験的に確認するとともに、水域ライダー観測の理解を深めたい。今後、多波長同時観測により成分識別能力を向上させるとともに、野外実験資料を蓄積し、実用化を進める予定である。

6. 参考文献

- 1.F.E. Hoge and R. N. Swift, Airborne detection of oceanic turbidity cell structure using depth-resolved laser-induced water Raman backscatter, Appl. Opt. Vol.22,No.23, p3778(1983)
2. S.Yamagishi et al., Determination of a Lidar Signal from Images of Backscattered Natural Light on Water Surface,17th IOOSC Tampa(2001)
- 3.G.M. Krekov et al.,Laser sensing of a subsurface ocean layer, Appl. Opt. Appl. Opt. Vol.37, No.9, p1589(1998)
- 4.F.E. Hoge et al., Inherent optical properties of the ocean: retrieval of the absorption coefficient of chromophoric dissolved organic matter from airborne laser spectral fluorescence measurements, Appl. Opt. Vol.22,No.23, p3778(1983)
5. B.M. Tsai and C.S., Gardner, Remote sensing of sea state using laser altimeters, Appl. Opt. Vol.21,No.21,p3932(1982)
6. C.D. Mobley, "Light and Water", Academic Press(1994)
7. J.H.Churnside et al., Lidar profiles of fish schools, Appl. Opt. Vol.36,No.24,p6011(1997)

Laser: Type Nd -YAG THG(355nm)
Pulse energy 11mj/pulse(4-6n)
Repetition 10Hz
Beam divergence 3mrad

CCD: Sensible area 6.52x4.89mm
659x494 Pixel
Sensitivity 3.0 lx

Image Intensifier :
Gate width 3ns-DC
Sensitivity 150 μ A/lm
Quantum efficiency 13%(400nm)
Gain 7x10³

Optics: UV lens: FOV 18.2degrees



Fig.1 Image of the laser spot on the water surface

Table 1 Specification of the Lidar

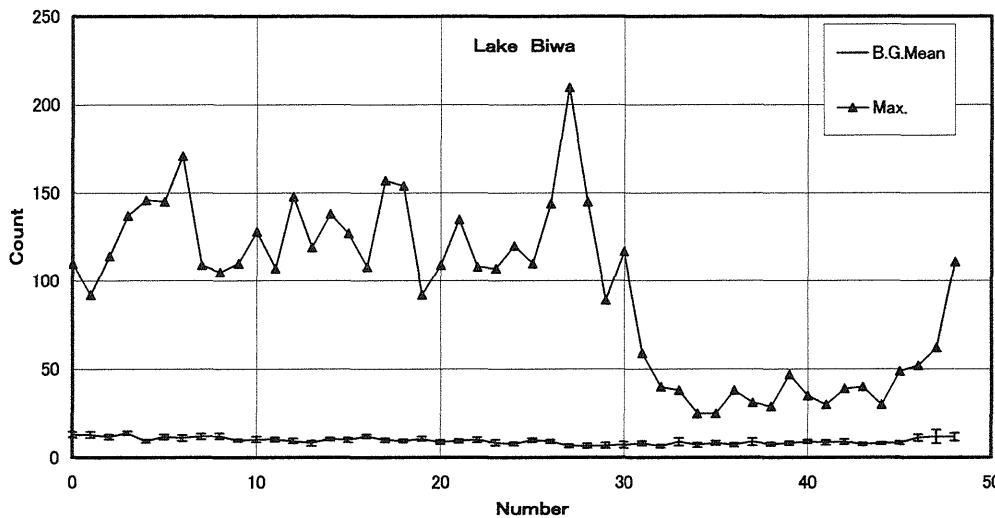


Fig. 2 Sequential data of the maximum (Max) of the laser spot and the mean value of the background (B.G.Mean) adjacent the laser

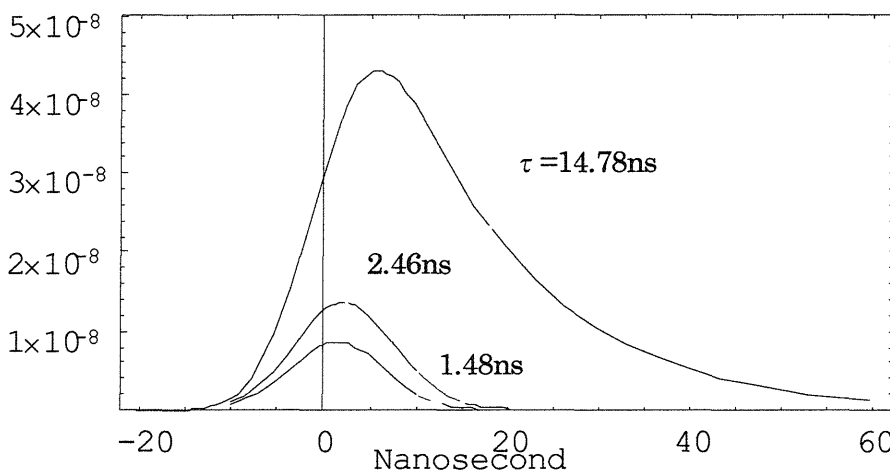


Fig.3 Backscattered Raman pulse calculated from the convolution of a lidar system, water surface and water column response.