

265nm LED ミニライダーの光学特性

椎名 達雄¹, 川上 康之², 池田 拓未², 片野 邦彦²

¹千葉大学 大学院工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

²スタンレー電気株式会社 (〒257-8555 神奈川県秦野市曾屋 400)

Optical characteristics of 265nm LED mini-lidar

Tatsuo SHIINA¹, Yasuyuki KAWAKAMI², Takumi IKEDA² and Kunihiro KATANO²

¹Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522

²Stanley Electric Co., Ltd., 400 Soya, Hadano-shi, Kanagawa 257-8555

Abstract: LED mini-lidar has improved to observe the lower atmosphere and the surface atmosphere in daytime and nighttime with the same signal-to-noise ratio as the LED light source of DUV 265nm wavelength is installed. In this study, we discuss how small the optical power is required for the near range observation. The signal-to-noise ratio is controlled by the pulse repetition frequency and the accumulation time with the small transmitting optical power. As it is in solar blind area, it can be accomplished up to the detection limit of the lidar echo signal. We considered it experimentally and theoretically.

Key Words: LED, 265nm, DUV, lidar, surface atmosphere

1. はじめに

本研究では大気用の LED ミニライダーを長らく開発している。学生の学習用、教育用として開発を始めたが、近場の大気を可視化できることからその利用、応用を求めるニーズがあることを知り、また、時空間スケールが小さい表層大気・低層大気の動きは複雑で、その挙動を捉えることは学術的価値も高いことを理解するようになった。ただ単に小さなライダーを開発するのではなく、表層・低層大気に追従し可視化できるライダーを目指して開発を進めてきた。光源を LED としたことは安全性や操作性を考慮してのことであったが、レーザーダイオード (LD) と比べて波長の選択性が高いこと、ラフな扱い、使用環境にも答えられることが利用や応用を広げる結果となった。送信光量が小さいため、受光の信号対雑音比 (SN 比) を向上させるためには、パルス繰返し周波数と積算回数を向上させて計測することとし、受光には当初よりホトンカウンティングを採用した。高いパルス繰返し周波数に追従し、かつ近距離を高分解に計測するため、高速・高分解なホトンカウンタを開発し性能向上に努めてきた^{[1]-[4]}。この度、ソーラブラインド波長となる 265nm LED を使ったミニライダーを構成した。DUV 領域はソーラブラインドとなり、大気背景光の影響を除いた大気用ライダーの構成が実現できる。レーザーで DUV 領域でライダーの構成を取ろうとすると、高調波による発振のため、大型化や調整の煩雑さ、並びに消費電力の増大を生じる。一方で、近年 265nm の LED が利用できるようになり、本研究でもその利用を展開してきた。DUV となるこの波長域ではエアロゾル散乱体の散乱断面積が大きくなるだけでなく、大気分子による散乱も大きい。本報告では理論解析とともに実装とその光学特性までを述べる。

2. Concept

低層大気・表層大気を計測するには時空間スケールの小さい、急峻な挙動を捉える必要がある。そのためにその動きに追従させたライダーの光学特性向上を目指してきた。一方で、低層・表層大気とは人の生活圏内での計測となる。安全性への配慮はもちろん、閉所内、開空間いずれの使用においても機器のサイズ、消費電力や計測方法等、これまでの大気用ライダーとは異なる導入、使い方となる。そのために機器を小型化の際に軽く (携帯化)、DC 電源化 (バッテリー駆動) できる構成をとった。また、生活圏での使用とは昼間の大気、空気の活動 (熱拡散や流動性) を計測の対象とする。尖塔光出力 (Peak Power) 100mW (=1nJ/10ns) で始めた LED ミニライダーで日中の太陽光下で観測を実現するためにはソーラブラインドエリアの波長を選択することが手段となる。265nmLED は近年開発が進み、特にコロナ禍では殺菌用途で 10mW 以上の高出力なものが選択できるようになった。本研究ではスタンレー電気社製 DUV (ZEUBE265-2CA 265nm, 50mW[max]) を使い、昼の計測を実現している。

3.理論解析と機器構成

DUV となるこの波長域ではエアロゾル散乱体の散乱断面積が大きくなるだけでなく、大気分子による散乱も大きい。具体的な大気エアロゾルの散乱係数と大気分子の散乱係数を次式で見積もった^[5]。

$$\alpha_m(\lambda) = \alpha_m(550) \cdot (\lambda/550)^{-4}$$

$$\alpha_p(\lambda) = \alpha_p(550) \cdot (\lambda/550)^{-0.8}$$

その結果、後方散乱係数は次のように見積もられた。

$$\beta_m(265) = \alpha_m(265)/50 = 7.662 \times 10^{-6} \text{ [/m]}$$

$$\beta_p(265) = 4.094 \times 10^{-6} \text{ [/m]}$$

Table 1 に理論解析とその後の装置構成に適用したライダーの仕様を示す。265nm LED (Stanley 電気社製 DUV-LED ZEUBE265-2CA) は CW 出力で 50mW のものであり、それをパルス発振させている。送信光口径が 25mmφ であることからビーム広がり角は 50mrad. と広がる。一方の受信光学系視野角は 5mrad 以下とするため、送信光利用率は 30%以下と低い。ライダー方程式と信号対雑音比の算出式を使い、Table 1 の送受信光学系でライダーエコーを求めた。信号対雑音比 (Signal-to-noise ratio: SN 比) の計算結果を示す。ソーラーブラインドでない波長域(530nm)で数十 mW の尖塔光出力では日中の観測はライダーエコーをほとんど観測し得ないが、265nm の波長域では十分に低い尖塔光出力でも十分なライダーエコーの観測が見込めることがわかる。繰返し周波数 1MHz であれば 1s 積算でこの感度を実現できる。また、尖塔光出力が小さくなると SN 比は下がるが計測距離が大きくなる変化していないことも見て取れる。計算では受信開口径を小さくした場合も試算しており、Fig.1 と同様の結果を得ている。

ライダーエコーの SN 比の向上はパルス繰返し周波数や積算回数で向上させることができる。したがって、この理論解析の結果から、265nmLED ミニライダーは現行の LED 送信光量よりもずっと光量を下げることが可能で、光学系の機器構成ももっと小さな構成が可能であることが示唆される。

瞳や肌への安全性に関しては DUV に対しては最大許容露光量 (MPE: Maximum Permissible Exposure) は 30J/m² の許容があり、LED ミニライダーの送信光量は安全性に問題はない。一方で、消費電力や送信光の発散の観点からも LED デバイスの小型化やパルス発振回路の最適化にまだ余力があることが伺える。

本研究では手のひらサイズの、DC バッテリーでも駆動可能な大気用ミニライダーを構成した。265nm を透過し、太陽背景光を OD6 でカットするために、NIR 領域までの専用コーティングと光学フィルタを併用して使用した。その結果、40,000lx の日中でも夜間の信号対雑音比と同等の結果が得られることを確認した。積算時間 1—10 秒ほどで最大計測距離の 150m までの観測が可能である。

Table 1 265nm LED mini-lidar specification.

Transmitter	LED Product	Stanley Co. Ltd.
	Wavelength [nm]	265
	Optical Peak Power [mW]	25
	Pulse Repetition Frequency [Hz]	1M
	Pulse Width [ns]	10
	Beam Diameter [mmφ]	25
	Divergence [mrad]	50
Receiver	Receiving Telescope Type	Reflecting
	Aperture [mmφ]	75
	Barrel Length [mm]	100
	Field of View [mrad]	3
	Detector	PMT

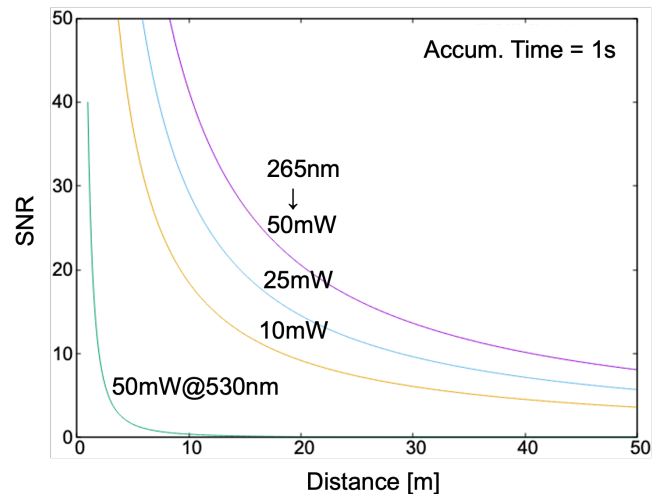


Fig.1 Lidar echo estimation with 265nm mini-lidar specification at Table 1.

4. 265nm LED ミニライダーの実計測

大気用ライダーではどのくらい小さい光出力で大気を計測できるのか？そのことを検証するために265nmLED ミニライダーを使って検討した。実験ではLED の発振回路に印加する正電圧を下げることによって光送信出力を変化させて計測した。積算回数(時間)は100M回(100秒)で計測した。背景光ノイズを除去し、大気ライダーエコーを評価している。Fig.2 にその結果を示す。Fig.2a)はライダーエコーの全体図、b)は拡大図である。Fig.2b)の黒線は電子ノイズであり、それよりもいずれの大気エコー波形も遠方(100m)までカウントが得られている様子がわかる。

パルス発振回路の通常正電圧のときには平均光出力は $75 \mu\text{W}$ (パルス幅 7.4ns)、光尖塔出力 $10.1\text{mW}(=75\text{pJ})$ である。正電圧を下げて光送信出力を下げた結果として、平均光出力は $<4.4 \mu\text{W}$ (パルス幅 68.7ns)、光尖塔出力 $64 \mu\text{W}(=4.4\text{pJ})$ においても十分に大気計測が実現できていることを確認した。

そこで波形の解析を行なった。大気エコーのピークカウントを抽出し、平均光出力との相関を求めた (Fig.3 a))。本来、送信光出力に対して、線形にライダーエコーカウントは減少するはずだが、大気エコーのピークカウントはゼロに漸近するように徐々に下がっていく。一方でエコーカウント総量で評価すると Fig.3 b)に示すように線形に減少の様子がわかる。大気エコーのピークカウントに波形が残りながら、その波形カウント総量が線形になるのは、遠方ほどエコーカウントが得られにくくなることで説明できる。大気エコーのピークカウントが非線形に減少することは現在も考察中である。

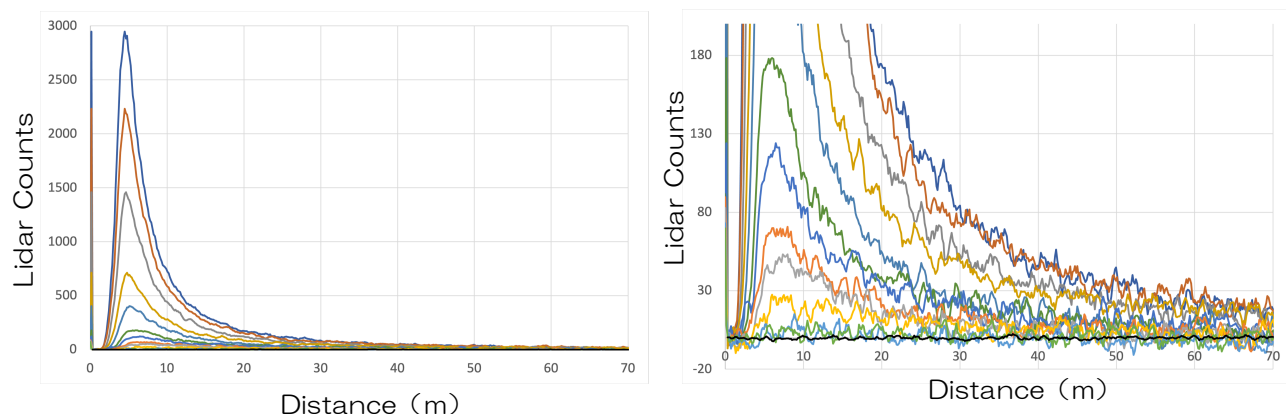


Fig.2 Lidar echo variation due to peak power. a) full waveform b) magnification.

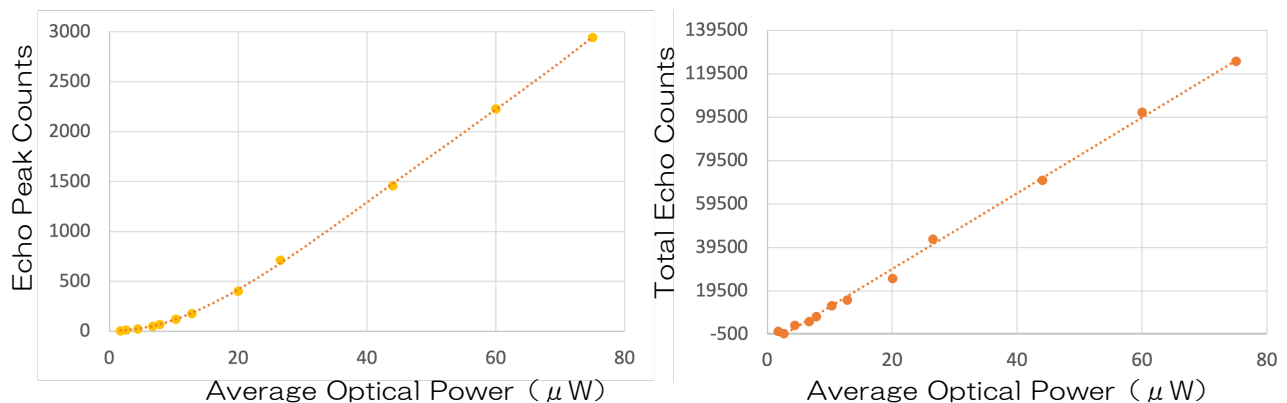


Fig.3 Echo peak counts and total echo counts changes due to average optical power.

a) Echo peak counts

b) Total echo counts

次に得られた大気エコーが実際に 100m まで届いているのかをハードターゲット（85m 先の木）を観測して検証した。Fig.4 に 10M 回（10 秒相当）での積算結果を示す。この図では平均光出力 $10.3\mu\text{W}$ （パルス幅 19.5ns）、光尖塔出力 0.53mW(10pJ)までの結果を示しており、ハードターゲットの波形が得られている様子がわかる。大気エコーのピークとハードターゲットの相関をとると線形の結果を得ていることがわかる（Fig.5）。10M 回の積算ではハードターゲットの信号が得られなかった送信光量でも積算時間を伸ばせば遠方まで光が届きハードターゲットエコーが得られる。実験では積算時間を 100M 回(100 秒相当)にして計測し、その際は $6.7\mu\text{W}$ （パルス幅 35ns）、光尖塔出力 0.19mW(6.7pJ)までハードターゲットエコーが得られることを確認している。つまり、弱い光でも十分遠方まで届き、かつそのエコーを取得できることを示している。

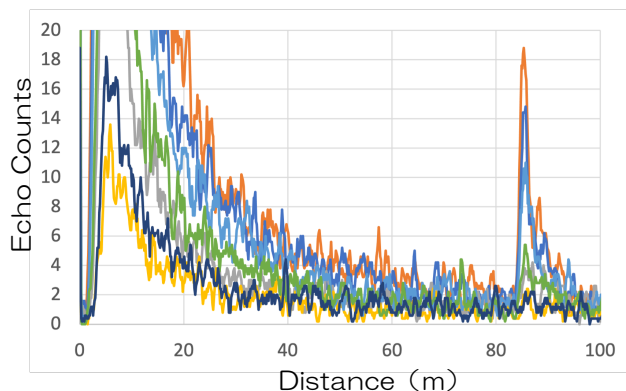


Fig.4 Hard target Measurement (Tree).

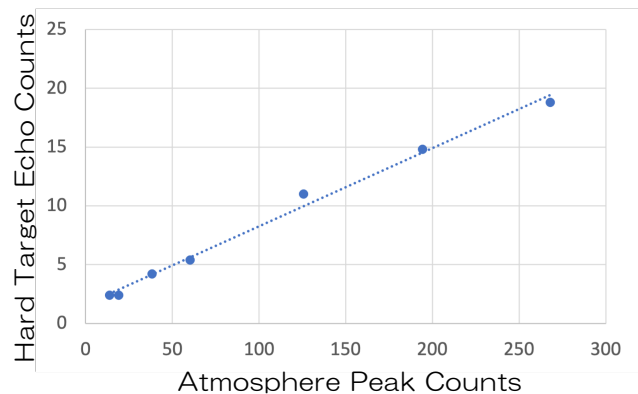


Fig.5 Correlation between Atmosphere and hard target echoes.

5. まとめ

本研究では LED ミニライダーの光学特性に関して報告した。特に 265nmLED を用いたことで昼夜を隔てることなく近距離大気計測が可能であることを議論した。その際に必要な光量は従来の大気用ライダーと比べると驚くほど小さい光量（<10pJ）で観測が可能であることを理論と実験とで示した。

LED ミニライダーは低層大気・表層大気の時空間スケールが小さい急峻な動きの可視化を昼夜問わず実現できる。引き続き社会実装（交通インフラ、生活圏大気環境）への応用を図り、新しい大気ライダーの使い方の提案を図る。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 16H03129, 19H02383, 23H01645 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 小山護哲 他, レーザー研究, **39** (2011) 617.
- 2) 椎名達雄 他, 日本リモートセンシング学会誌, **38** (2018) 317.
- 3) T. Shiina, Sensors, **19** (2019) 569.
- 4) 椎名 達雄, レーザー研究, **48**, (2020) 604.
- 5) J. Xian et al, Optics Express, **28**(16), (2020) 23829-23845