

椎名 達雄 南 英治 伊藤 昌文 岡村 康行

Tatsuo Shiina, Eiji Minami, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura

和歌山大学システム工学部

Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

**Abstract**

This study reports the analyses of optical characteristics for in-line type compact LIDAR. At first, the annular beam propagation was calculated and compared with Gaussian beam propagations. Next, geometrical form factors of LIDAR equation and signal-to-noise ratios of simulated LIDAR echo were also estimated with the annular beam and in-lined optics. The results were compared with coaxial LIDAR optics with a Gaussian beam. These results show the unique features that the annular beam gets to be transformed to the main sharp beam with the narrow diffraction angle, and that echoes could be obtained from right after the LIDAR system.

**1. はじめに**

気象災害予測、特に豪雨・落雷予測のためのライダー防災システムの開発を目標に研究を行っている。そのためには雲の内部観測が不可欠となる。通常のライダーにおいてレーザービームは 200m~300m しか雲中を透過しない。本研究では雲のより深い部位の構造や変化を捕らえるために、ライダーシステムの構成を検討した。その具体的試みとしてインライン型ライダーの開発をスタートしている。

インライン型ライダーは送受信に共通の望遠鏡を利用するもので、これにより送信レーザービーム径を大きくでき、伝搬時の回折の効果を抑えることができる。また、送受信視野が常に重なるため、光軸調整がしやすい。一方デメリットとして送信レーザービームとエコー光との分離に工夫が必要なこと、望遠鏡に反射型を使用する場合、副鏡がビームの出射を妨げることが挙げられる。本研究では光サーキュレータ、波面変換プリズム等の導入によりこれらのデメリットを解消してきた<sup>1)5)</sup>。

本報告では製作中のインライン型ライダーシステムの光学特性を解析するとともにライダーエコー光光量の見積もりを行った。以下にその詳細を述べる。

**2. ライダーシステムの構成と解析**

解析は製作中のライダーシステムの構成を基に行っている。レーザー光源、受光器および送受信望遠鏡の仕様を Table 1 にまとめる。

解析では、送信レーザービームの外形をガウス光（口径 300mm<sup>φ</sup>、100mm<sup>φ</sup>）及び環状光（口径 300mm<sup>φ</sup>）として計算を行った。ガウス光振幅分布  $g(x)$  は正規化した式(1)で表される。

Table 1. Specification of In-line type Compact LIDAR

Light Source Energy / Pulse width Wavelength	Diode Pumped Nd:YLF Laser 80 $\mu$ J / 5ns 1.047 $\mu$ m
Detector Responsibility Quantum Efficiency Noise Factor	NIR Enhanced Si APD 36A/W at 1.064 $\mu$ m 40% 3.2
Telescope Clear Aperture Focal Length Field Stop Aperture	Schmidt Cassegrain 305mm <sup>φ</sup> 3048mm 650 $\mu$ m
System Parameters Optical Efficiency Spatial Resolution	0.3 7.5m ( $\Delta t=50$ ns)

$$g(x) = \exp\left[-\left(\frac{x/(D/2)}{h}\right)^2\right] \quad (1)$$

ここで、D は送信光学系の開口径、h は 1/e のを与える半値幅である。x は開口径方向の位置を表す。

また、環状光振幅分布は実際に使用している波面変換プリズムの構成を基にして式(2)で表される<sup>6)7)</sup>。

$$A(x) = \sqrt{\frac{D/2-x}{x}} g(D/2-x) \quad (2)$$

送信ビーム強度は口径 300mm<sup>φ</sup> の円筒形矩形光光量を基準として、ガウス光、環状光ともに出射光量が同一となるよう計算している。

式(1)および(2)による送信レーザービーム強度分布を Fig.1 に示す。

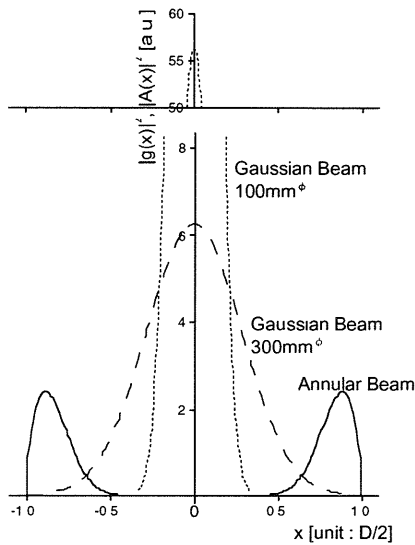


Fig.1 Transmitting Gaussian and Annular Beams.

### 3. 環状ビーム伝搬特性

送信レーザービームの伝搬特性は円形開口に対するフレネル回折を計算することで行った。ビーム伝搬距離  $r$  に対するビーム外形の変化を Fig.2 にまとめる。出射する際のビームの広がりには考慮していない。

ガウス光はその形状を大きく変えることなく、広がっていく。一方環状光は出射時の環状ビームが伝搬に従い中心にビーム強度を移していく様子がわかる。環状光のこの性質を積極的に利用することで雲のより深いところまでレーザー光を届かせることが期待できる。中心光周りの2次以降の回折リング光の数及び強度は波面変換プリズムに入射するガウス波形の  $h$  の値に依存している<sup>6)</sup>。

次にビーム伝搬距離に対する中心光強度の変化および半値幅の変化を Fig.3 にまとめる。Fig.3(a)から、先に述べた環状光の性質がはっきりと分かる。つまり、環状光中心強度は

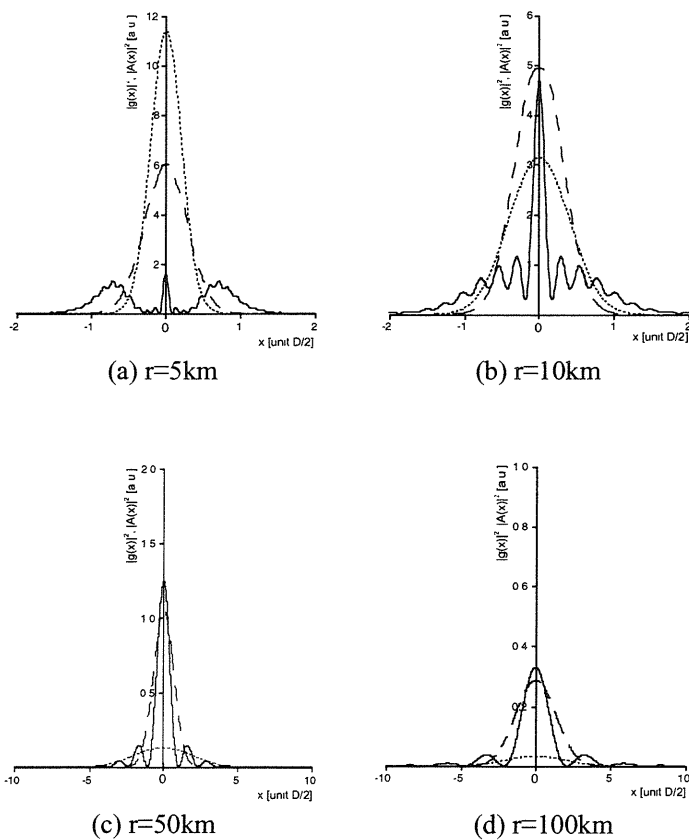
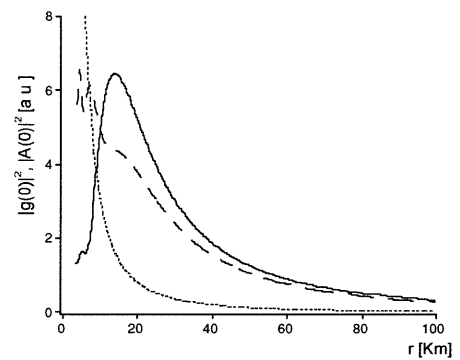
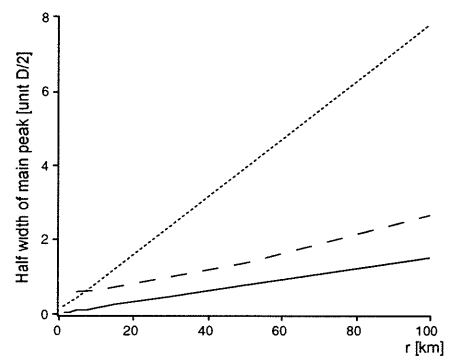


Fig.2 Variations of transmitting laser beams in regard to the propagating distance  $r$ . Solid lines indicate the annular beam of diameter  $300\text{mm}\phi$ , dashed lines and dotted lines express gaussian beams of diameter  $300\text{mm}\phi$  and  $100\text{mm}\phi$ , respectively.



(a) Variations of the center intensity



(b) Variations of the half width

Fig.3 Variations of intensities and half widths at  $1/e^2$  maximum of the center main peaks. Solid, dashed and dotted lines indicate annular( $300\text{mm}\phi$ ) and gaussian beams( $300\text{mm}\phi$ ,  $100\text{mm}\phi$ ), respectively.

出射次には0であったものが伝搬に従って大きくなり、ある距離のところで最大強度をとる。また、Fig.3(b)からは、中心光半値幅が環状光と同径のガウス光とほぼ同じ広がり角で伝搬していく様子が見える。

#### 4. エコー信号受光特性

ライダー方程式によるエコー光光量の計算を行った。まず送信レーザビームの外形とライダー光学系の幾何学的な配置とからライダー方程式の視野重なり関数  $Y(r)$  を計算した。計算の方法は参考文献 8)-9) に依った。また、ライダーエコー光光量の計算は以下に示すライダー方程式(3)を基に SN 比[式(4)]を求めることを行った<sup>10)</sup>。

$$P(r) = P_0 \cdot K \cdot Y(r) \cdot A_r \cdot \frac{c\tau}{2} \cdot \beta \cdot \frac{1}{r^2} \cdot T(r)^2 \quad (3)$$

$$T(r) = \exp\left[-\int_0^r \alpha(s) ds\right]$$

$$SNR(r) = \frac{\sqrt{M} \sqrt{\eta \cdot \frac{\Delta t}{h\nu}} P(r)}{\sqrt{\mu \sqrt{P(r) + P_b + P_d}}} \quad (4)$$

ここで、 $r$  はビーム伝搬距離、 $P_0$  はレーザ送信出力光強度、 $K$  は光学的効率、 $Y(r)$  は視野の重なりを表す関数、 $A_r$  は受信望遠鏡開口径、 $c$  は光速、 $\tau$  はレーザ光パルス幅である。 $\beta$  は大気後方散乱係数、 $T$  は大気透過率、 $\alpha$  は大気減衰係数である。さらに、式(4)において、 $M$  は積算回数、 $\eta, \mu$  は受光器量子効率及び雑音指数、 $\Delta t$  はサンプリング時間、 $h\nu$  は光子のエネルギーである。 $P_b$  は背景光強度、 $P_d$  は受光器等による電子的な雑音である。

Table 1 に示したライダー諸定数を用いて視

野重なり関数  $Y(r)$  及び  $SNR(r)$  を計算した結果を Fig.4 にまとめる。結果は  $100\text{mm}^\phi$  のガウス光と  $300\text{mm}^\phi$  の環状光をそれぞれ出射した場合を表している。前者は望遠鏡副鏡にミラーを配置し、そこから  $100\text{mm}^\phi$  のガウス光を出射する場合に相当する。後者の環状光の計算は本ライダーシステムのインライン型を考慮したものである。ガウス光、環状光ともに送信レーザビームの広がり角を  $0.05\text{mrad}$ 、受信視野角を  $0.1\text{mrad}$  として行っている。さらに今回の計算では  $\beta = 3.4 \times 10^{-6}$  とし、 $P_b$  及び  $P_d$  は考慮していない。

受信視野角は受信望遠鏡焦点位置にピンホール (Field stop aperture :  $650\mu\text{m}$ ) を想定することで計算できる。このことから視野角は  $100\mu\text{rad}$  と狭くできるが、Fig. 4(a) から  $Y(r)$  が 1 まで立ち上がるのにガウス光で  $2\text{km}$  以上、環状光で  $5\text{km}$  以上を要していることがわかる。しかし、環状光をインラインで出射する際の特徴はむしろ近距離に現れる。レーザビームを環状としているため、原理的に距離  $0\text{m}$  からエコーが戻る。エコー光光量の計算ではこのことが大きく反映される。Fig.4(b) より、距離  $0\text{m}$ 、つまりライダー装置のすぐ先からエコー光が受光できる様子が見える。

環状光に対して送信時の広がり角を変えたときの  $Y(r)$ 、 $SNR(r)$  の変化を Fig. 5 にまとめる。計算では送信レーザビーム径を受信開口径にまで広げているため、視野重なり関数  $Y(r)$  への影響が大きいことが Fig.5(a) から分かる。Fig.5(b) の SN 比の計算にはその  $Y(r)$  の影響が大きく現れている。

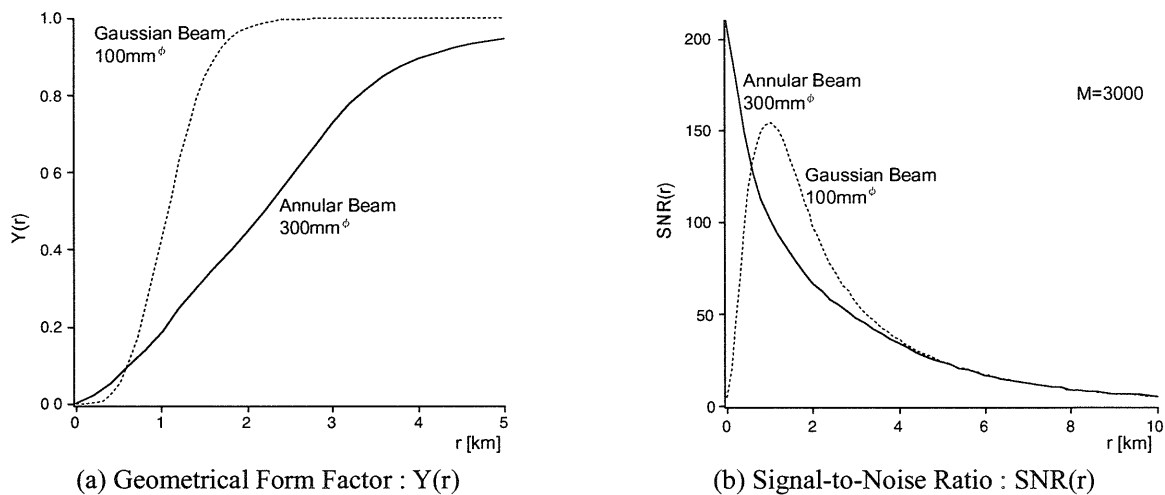
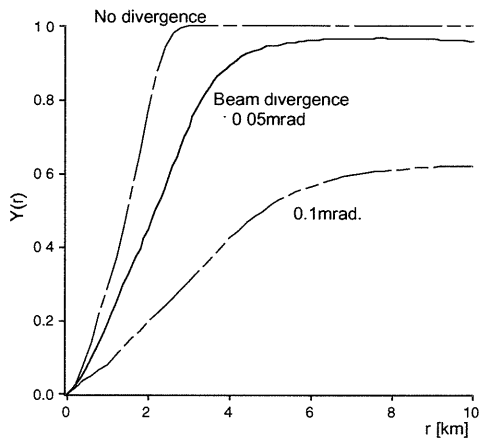
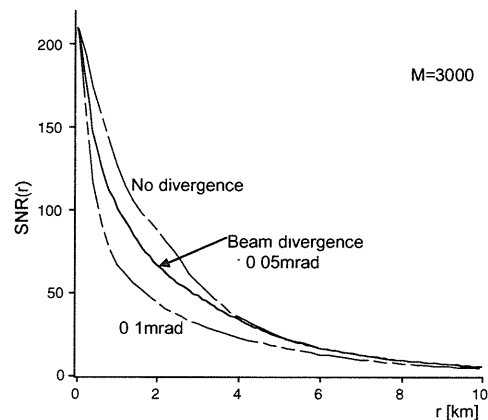


Fig.4 Geometrical form factor  $Y(r)$  and  $SNR(r)$  of simulated LIDAR echo with the annular beam (Solid line) and  $100\text{mm}^\phi$  Gaussian beam (Dotted line). Beam divergences are  $0.05\text{mrad}$ .



(a) Geometrical Form Factor :  $Y(r)$



(b) Signal-to-Noise Ratio :  $SNR(r)$

Fig. 5 Variations of geometrical form factor  $Y(r)$  and signal-to-noise ratio  $SNR(r)$  of simulated in-line type LIDAR with the 300mm<sup>φ</sup> annular beam according to transmitting beam divergence.

## 5. まとめ

本研究ではインライン型ライダーにおける光学特性の解析を行った。

まず、本ライダーシステムの特徴である環状光の伝搬特性を解析した。環状光として出射したビームが回折の効果により中心光強度を強める形で伝搬していく様子を見るとともに、その中心光強度分布が従来のガウス光や矩形光の回折パターンと比べて狭いまま伝搬していくことを確認した。このことは、ライダー観測時の空間分解能を向上させるとともに、雲内部等の多重散乱が強く生じる媒質中においてもより深いところまでライダー送信光を伝搬させ得ることが期待できる。

次に送信時の回折パターンを考慮してインライン型ライダーシステムの受光特性の解析を行った。環状光を使うことで、原理的にはビーム出射直後から受光が得られることを解析により確認した。この効果はライダーエコーの計算において顕著に現れる。本来ならばライダーエコーが受光できるまでに一定の距離が必要であるが、インライン型ライダーではビームの出射直後からエコーの高い S/N が得られる。

一方、送信ビーム径を受信光学系開口径にまで広げた場合、送信ビーム広がり角に対するエコー光光量の依存性は大きい。しかし、インライン型である故、送信ビーム広がり角は受信視野角よりも小さく設定することが容易である。また、環状光ビーム径を受信開口径より小さくすることでもこの依存性を緩和することが可能である。

インライン型ライダーの以上のメリットを積極的に利用することで、航空機搭載型ライ

ダーでの雲上部および雲中計測や衛星搭載ライダーの長距離計測にも応用が期待できる。本研究では環状光伝搬時のビーム外形変化の性質や近距離計測の特徴を活かし、低層大気・雲内部でのライダー計測を狙っていく予定である。

## 参考文献

- 1) Eiji Minami, Tatsuo Shiina, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "In-line Type Lidar System for Cloud Measurement", Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, p.576, 2001
- 2) 南英治, 椎名達雄, 伊藤昌文, 岡村康行, 「インライン型ライダーシステムの光学系の検討」, '01 電子情報通信学会総合大会, p.394, 2001
- 3) Tatsuo Shiina, Masafumi Ito, and Yasuyuki Okamura, "Design Consideration of Compact Lidar Optical System for Disaster Prediction", Conference Abstract of 20th International Laser Radar Conference, p.21, 2000
- 4) 南英治, 椎名達雄, 伊藤昌文, 岡村康行, 「インライン型ライダー送受信分離用光サーキュレータ」, 信学技報, Vol.100, No.427, pp.43-48, 2000
- 5) 椎名達雄, 伊藤昌文, 岡村康行, "雲探査ライダー用光サーキュレータ", 2000 年電子情報通信学会総合大会講演論文集 エレクトロニクス 1, p.187, 2000
- 6) Keizo Kono, Yasuo Mitarai, and Takumi Minemoto, "New Super-Resolution Optics with Double-Concave-Cone Lens for Optical Disk Memories", Optical Memory and Neural Networks, Vol. 5, No. 4, pp.279-285, 1996
- 7) Keizo Kono, Mitsuru Irie, and Takumi Minemoto, "Generation of Nearly Diffraction-Free Beams Using a New Optical System", Optical Review, Vol. 4, No. 3, pp.423-428, 1997
- 8) 杉本 伸夫, 松井 一郎, 笹野 泰弘, 「低層大気構造観測用ライダーにおける幾何光学的効率と送受信光学系の設計」, 光学, Vol. 19, No. 10, pp.687-693, 1990
- 9) 杉本 伸夫, 松井 一郎, 「大気境界層の観測を目的とする目に安全なライダーの設計」, 光学, Vol. 21, No. 5, pp.346-349, 1992
- 10) 山口 一郎, 角田 義人編, 「半導体レーザと光計測」, 学会出版センター, 1992