

# 雷検知を目的としたインライン型ライダーシステムの開発 —計測原理とシステム設計—

## In-line type Lidar System for Lightning Detection –Principle and System Design-

椎名達雄<sup>1</sup>、宮本正和<sup>1</sup>、本田捷夫<sup>1</sup>、福地哲生<sup>2</sup>、野口和夫<sup>3</sup>

Tatsuo Shiina<sup>1</sup>, Masakazu Miyamoto<sup>1</sup>, Toshio Honda<sup>1</sup>, Tetsuo Fukuchi<sup>2</sup>, Kazuo Noguchi<sup>3</sup>

1.千葉大学大学院融合科学研究科, 2.電力中央研究所, 3. 千葉工業大学工学部

1.Chiba University, 2.Central Research Institute of Electrical Power Industry, 3.Chiba Institute of Technology

### Abstract

When lightning discharges occur in the atmosphere, the atmosphere is partially ionized and the polarization plane of a propagating beam undergoes rotation due to the magneto-optical effect. For measuring the rotation, i.e., detecting the lightning, a high-precision polarization lidar has been developed. This lidar uses in-line optics with a polarization-independent optical circulator. A pair of Axicon prisms was also installed to transform the wavefront into the annular beam. These techniques enable observation of low-altitude clouds with a narrow field of view. We designed the new concept lidar system and started its fabrication.

### 1. はじめに

本研究ではこれまで集中豪雨や落雷などの局所的気象災害を対象として、防災を目的としたインライン型ライダーの開発を行ってきた<sup>[1]-[3]</sup>。偏光解消効果をもつ氷晶のモニタリングにより、豪雨や落雷につながる気象因子を導出することを目指し、通年観測を行っている。本装置は Micro Pulse Lidar (MPL) の構成をとっており、光サーキュレータ、環状光の利用によって送受信一体（インライン）型を実現している。これにより、狭い受光視野故に多重散乱光を除去しての偏光解消度の計測が可能である。送受信視野が常に重なるため最近距離からの大気／雲計測が可能である。これまでの観測で、豪雨の予兆を捉えることに成功している。しかし、落雷と氷晶の動きとを関連付けることは容易ではなく、より直接的な雷・放電の計測が必要である。そこで本研究では放電に伴う電磁界分布の変化が伝搬光偏光角に変化を与えるファラデー効果に着目し、雲中放電のライダー計測を目標として、電離した大気中に雷放電の電磁界変化によって生じる微弱な伝搬光偏光面の回転角を測定する高精度偏光測定用ライダーの開発を始めた。本報告では特に光学系を中心として、ハイパワー偏光無依存型光サーキュレータ、環状光生成について報告する。

### 2. 計測原理

磁場が存在する電離媒体中を伝搬する光の偏光面が回転する現象はファラデー効果として知られている。この効果は結晶中等の固体だけでなく、電離した気体にも作用する。電子密度を  $n_e$ 、伝搬方向における磁場成分を  $B$ 、電磁波の波長を  $\lambda$  とした場合、偏光回転角  $\delta$  は  $n_e B \lambda^2$  に比例する。光が電離した気体中を距離  $L$  ( $=L_1-L_2$ ) にわたり伝搬した際の偏光回転角は(1)式で得られる<sup>[4]</sup>。

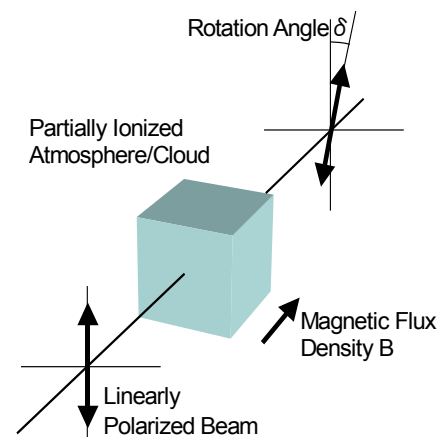


Fig.1 Faraday effect.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{L_1}^{L_2} (n_+ - n_-) dz$$

$$= 5.24 \times 10^{-13} \lambda^2 \int_{L_1}^{L_2} n_e B dz$$
(1)

ここで、 $n_+$ 、 $n_-$ は右回りと左回りの円偏光に対する屈折率である。

ファラデー効果を雷計測に応用する場合、放電に伴う大気の電離量（電子・イオン密度）と放電に伴う電磁界分布の変化量が必要になる。偏光面回転角が $\lambda^2$ に比例することから、波長が短い可視光等では大きな回転角が得られない。これまでに雲-地上間において実際の帰還放電電流の1/10を想定した放電シミュレーションによる解析を行った結果、532nmの可視光で回転角1度以下と推定された。更に、インパルス放電発生器を使った室内実験においても同様の結果を得ている<sup>[5]</sup>。また、その微弱な偏光面回転角を計測するための受信系として30dB以上の偏光消光比を持つ差動増幅が有効であることを確認した<sup>[6][7]</sup>。

### 3. システム設計

#### 3.1 ライダーシステム概要

雷雲を検知し、雲間放電の位置を評定することを目的としたライダーシステムを構築している。天頂方向を含む全天を計測エリアとし、特に低空の雨雲・雷雲を対象とした場合、送受信に共通の光学系を利用し、狭い受信視野において高精度な偏光計測が期待できるインライン型ライダーに利点がある<sup>1)</sup>。本研究ではその実現にあたって、光サーキュレータ、環状光生成光学系、ならびに観測方向のスキヤニング機構を開発した。高精度偏光計測用ライダーシステムの送信光学系概観を Fig.2 に、仕様を表1にまとめる。インライン型の構成をとることで送受信視野角0.1mrad以下でブラインドエリアのない理想的なライダーエコー受信特性が得られる。その反面、レーザ光を出射する際に各光学素子からの反射光が受光器に戻ってしまう問題がある。反射光の影響を除去する方策として、本システムでは各光学素子を光軸に対して僅かに傾けて正反射光を逸らせると共に、受光器にはゲート機能付光電子増倍管（PMT：H10304 浜松ホトニクス製）を利用することで迷光を除去する。観測範囲は最近距離から20kmとし、現状では初期開発として、観測方向のスキヤニング範囲は Fig.2 に示す範囲となっている。

Table.1 Lidar Specification.

Laser	Nd:YAG Laser
	Pulse Energy 200mJ
	Wavelength 532nm
	Repetition rate 10Hz
	Beam Diameter 27cmφ
Telescope	Shmidt-Cassegrain
	Aperture 28cmφ
	Field of View 0.1mrad
Detector	PMT (2 ports for pol.)
	Filter bandwidth 3nm
Observation	Range 0-20km(max)

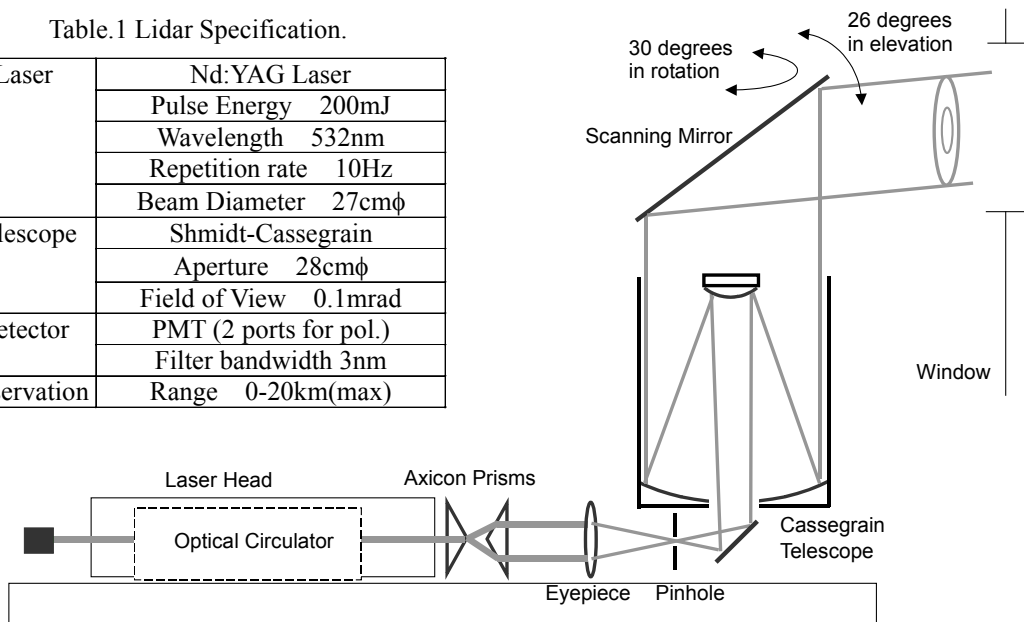


Fig.2 New in-line Lidar system.

### 3.2 主要光学系

#### (i) ハイパワー用偏光無依存型の光サーキュレータ

偏光成分毎の差動検出をインラインで実現するために、Fig.3 に示す偏光無依存型の光サーキュレータ光学系を設計・製作した。Nd:YAG レーザのジャイアントパルスに対しての耐性を確保するため、光サーキュレータを構成する $\lambda/2$ 板(HWP)、Gran Laser Prism(GLP)、Faraday Rotator(FR)、およびミラー(M)は耐光衝撃値、透過率、偏光消光比に優れたものを使用している。光学系に導入するレーザ光は 8mm 径の直線偏光で、二枚のミラーを介した後、HWP1、入射側 GLP1 によって p,s 直線偏光に強度比が 1 : 1 となるように分配される。その後 p,s 両偏光は FR, HWP を通りそれぞれ s,p 直線偏光成分となって出射側 GLP2 で合波される。サーキュレータ出射光は環状光生成のためのアキシコンプリズム、Eyepiece、Spatial Filter を通って望遠鏡へと導出される。一方、受信光は先の光路を逆に進み、p 受光成分は GLP3 により紙面垂直方向 (GLP-出射角 22 度) へ取り出される。また、s 受光成分は GLP1 によって受信ポートで取り出される。光サーキュレータの送受信挿入損失 (透過光強度比) を Table 2 にまとめる。レーザ送信光の出射効率は 86% であり、個々の光学素子の損失を考慮して妥当な結果となった。また、受信光の p,s 偏光消光比は 30 dB 以上の高い消光比を持ち、設計値を満足する精度を得ることができた。受信器にはゲートを掛け、15ns のパルス出射光が後述のアキシコンプリズム対、アイピース、ならびに望遠鏡といった光学系を通過するまで受光感度を下げ、PMT の保護を図る。

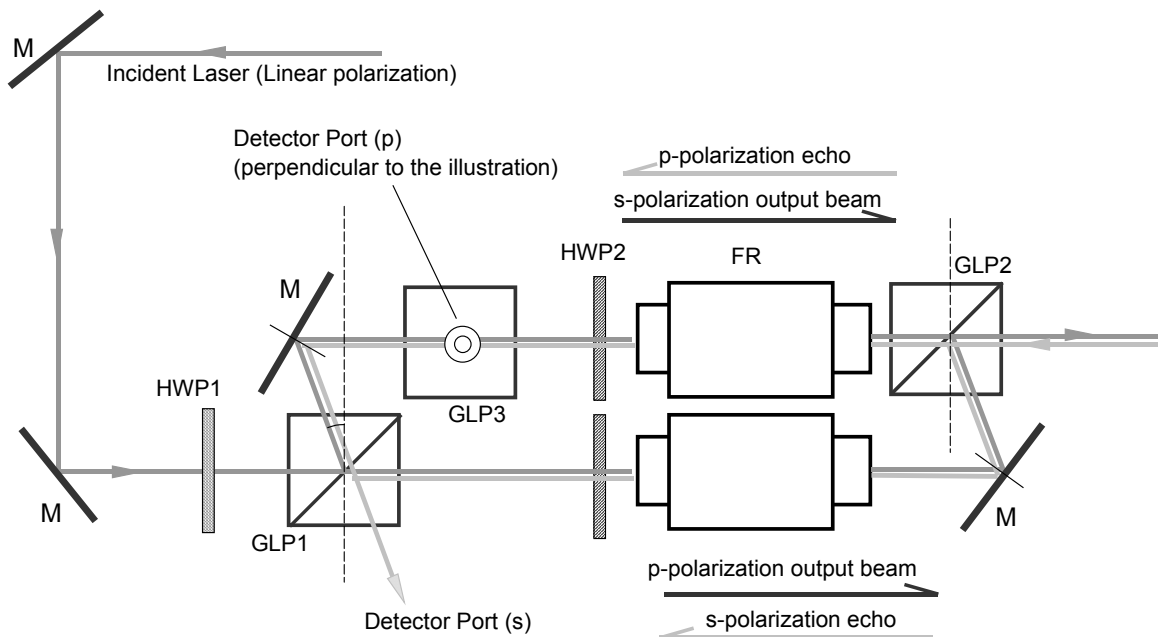


Fig.3 Polarization-independent optical circulator

Table 2 Insertion and isolation characteristics of the optical circulator.

Mode	Pol.	Insertion loss (Output)	Isolation(Receiver Ports)	
			p-pol. echo	s-pol. echo
Transmitter	p	1.01dB	>39dB	>39dB
	s	1.08dB		
Receiver	p	1.25dB	-	>35.9dB
	s	1.65dB	>35.4dB	-

## (ii)環状光生成光学系

インライン型光学系において、望遠鏡の副鏡によってレーザー射出光が妨げられることを避けるため、また長距離伝搬時の非回折ビーム利用のために、環状光の導入は効果的である。本システムでは環状光生成にアキシコンプリズム対を使用した。構成を Fig.4 に示す。レーザー光強度が大きいので、プリズム端面に AR コーティングを施していても反射光が無視できない。そのために、端面を光軸に対して僅かに傾ける（1 度）ことで、その反射光を光軸から逸らしている。これにより、光サーキュレータの高い偏光消光比を維持したままビーム断面を環状へと変換する。出射する環状光の外径と内径は使用するカセグレン型望遠鏡の口径ならびに副鏡の径によって決められる。プリズム出射時の環状光外径は 16.4mm( $R=8.2\text{mm}$ )となった。環状光内の光量バランスが長距離伝搬時の波面変換に大きく影響するため、プリズムの位置決めは高精度に行う必要がある。

Table 3 Specification of Axicon prism.

Supplier	Doric Lenses
Tilt Angle	10deg.
Wedge	1deg.
Diameter	30mmf
Material	BK7
Coating	AR Coating
Peak to Valley	$3\ \mu\text{m}$

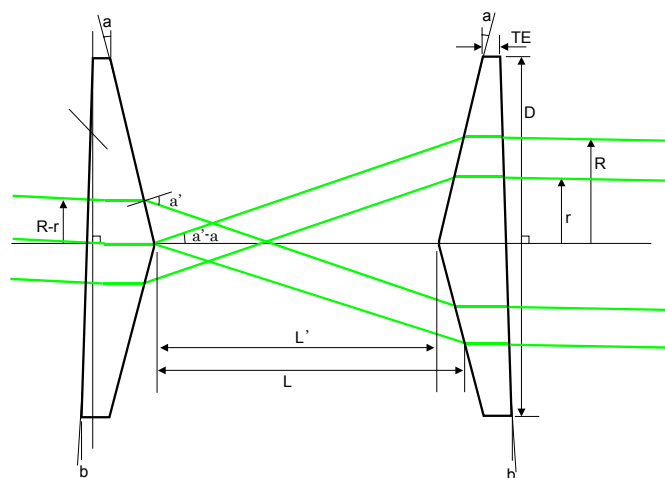


Fig.4 Beam transformation by using a pair of Axicon prisms.

## 4. まとめ

電離した大気中に雷放電の電磁界変化によって生じる伝搬光偏光面の回転角を測定する高精度偏光測定用ライダーを設計した。すでに実際の製作を始めている。その過程で、シミュレーションで得られた 30dB 以上の偏光消光比を満たす偏光無依存型光サーキュレータを構築した。また、ハイパワー用途を考慮したアキシコンプリズム対の導入によって、挿入損失の少ない環状光の生成を実現している。現在ライダー受信系の製作を進めるとともに、m級の大气中ギャップ放電を用いた実験にて偏光面回転角の実計測を行っている。解析の結果と照合し、ライダー受信系の設計に結果を演繹する予定である。

## 参考文献

- 1) T. Shiina et al, "In-line type micro pulse lidar with annular beam -Experiment-", Appl. Opt. Vol.44, No.34, pp.7407-7413, 2005
- 2) T. Shiina, K. Yoshida, M. Ito, and Y. Okamura, "In-line type micro pulse lidar with annular beam -Theoretical Approach-" Applied Optics, Vol.44, No.34, pp.7467-7473, 2005
- 3) T. Shiina, E. Minami, M. Ito, and Y. Okamura, "Optical Circulator for In-line Type Compact Lidar", Applied Optics, Vol. 41, No. 19, pp.3900-3905, 2002
- 4) 川端 一男、岡島 茂樹、プラズマ・核融合学会誌、第 76 巻第 9 号、pp.845-847、2000
- 5) 椎名 達雄、本田 捷夫、福地 哲生、"電離大気高圧放電下における伝搬光偏光回転角の評価"、電気学会、論文誌 A 127 巻 4 号 pp.187-192, 2007
- 6) T. Shiina, T. Honda, and T. Fukuchi, "Rotation Angle Measurement of Proceeding Beam Polarization under High-Voltage Discharge", Proceedings of 23<sup>rd</sup> ILRC, Part I, pp.87-90, 2006
- 7) T. Shiina, T. Honda, and T. Fukuchi, "Examination of Lidar Lightning Measurement", SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Vol.6409, pp.64090Y-1-9, 2006