

平成21年 5月27日現在

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2006～2008

課題番号：18681026

研究課題名（和文） 防災用インライン型ライダーシステムの高精度化

研究課題名（英文） Precision improvement of in-line typed lidar system for disaster prediction

研究代表者

氏名（ローマ字）：椎名 達雄（Tatsuo Shiina）

所属機関・部局・職：千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号：80304187

研究成果の概要：

局所的で急峻に変化する低空氷晶雲を30 dB以上の高精度で偏光解消度を計測できるライダーシステムを開発した。本システムではps両偏光成分をバランスをとって射出し、両成分のエコー光を同時に計測することで高精度の偏光消光比を実現している。作動検出によって偏光消光比算出の高いダイナミックレンジを確保した。そのために偏光無依存型光サーキュレータを新たに開発した。偏光消光比の高精度計測の実現によって雷放電による伝搬光の偏光面回転角の測定が期待できる。本研究ではその理論的、実験的考察に関しても検証を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
18年度	2,500,000	750,000	3,250,000
19年度	2,300,000	690,000	2,990,000
20年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	7,000,000	2,100,000	9,100,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 ・ 自然災害科学

キーワード：防災、大気現象、計測工学、自然現象観察・予測、自然災害

1. 研究開始当初の背景

局所的で急峻に変化する低空氷晶雲による豪雨／落雷を予知予測することを目的に2000年—2003年に防災用ライダーシステムの開発を行った。氷晶は偏光した光が入射すると偏光面の異なる光を後方に散乱する偏光解消効果を持つ。雨粒等球状粒子は多重散乱によって偏光解消を生じることがあっても、単一Mie散乱では偏光解消は生じない。狭い視野角でライダーエコー光を計

測することで、多重散乱光を除去し、氷晶からの偏光解消度を計測することが可能となる。本研究では送受信光を同一光路で分離し、かつ偏光解消効果を計測できる偏光依存型光サーキュレータを開発した。これによって近距離から送受信視野が常に重なるインライン型光学系を実現できた。0.1mradの狭い視野角で10mの最近距離からライダー計測が可能となった。光サーキュレータによるライダーエコー光の偏光消光比は

20dB を得た。このライダーシステムによって低空氷晶雲の精度よい観測をなし得た。豪雨の予兆を計測することもできた。

一方、課題としてシステムを Eye-safe としたために、雲や雨粒からのエコー光は受信できるものの、大気エコー光を得ることが難しい。また、雷雲を観測した際に特徴的なライダーエコー光を観測できているものの、エコー光と落雷との因果関係を示すには至らなかった。これらの背景を踏まえて、本研究課題を行うに至った。

2. 研究の目的

偏光解消度を高精度に計測できることから、氷晶の偏光解消度を測定するだけでなく、雷放電による伝搬光への影響が捕えられるのではと考えた。つまり、放電によって生じる磁束の変化が伝搬光の偏光面を回転させるファラデー効果が捕えられれば、雷放電の3次元的な位置、さらには放電電流量、大気電離度の推定が期待できる。そこで以下の項目を目的として研究をスタートした。

1. 大気／雲中放電に伴うファラデー効果による伝搬光の偏光面回転角を数値解析により概算し、必要な測定精度の見積もりを行う。
2. 放電実験において伝搬光の偏光面回転角を測定し、雷放電の遠隔計測への適用可能性を明らかにする。
3. 30dB 以上の高精度な偏光解消効果の計測を実現できるライダーシステムの開発をおこなう。

3. 研究の方法

電離した大気中を磁界 B に平行に伝搬する光の偏光方向はファラデー効果によって回転する。回転角の大きさは電子密度 N_e と光の伝搬方向における磁界成分の積に比例する。磁界 B に沿って伝搬する直線偏光した波長 l 、角振動数 $\omega = 2\pi c/l$ (c =光速) の光を考えた場合、直線偏光は右回りと左回りの円偏光に分解され、それぞれの円偏光に対する屈折率 n_{\pm} は式(1)で与えられる。

$$n_{\pm} = \sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{1}{1 \pm \omega_{ce}/\omega}} \quad (1)$$

ここで $\omega_{pe} = (e^2 N_e / \epsilon_0 m_e)^{1/2}$ はプラズマ周波数、 $\omega_{ce} = eB/m_e$ は電子サイクロトロン周波数、 e は電子電荷、 m_e は電子質量、 ϵ_0 は真空の誘電率、 N_e は電子密度である。また、距離 $L = L_1 - L_2$ を伝搬した光の偏光方向の回転角は式(2)で得られる。

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

$w_{pe}/w \ll 1$, $w_{ce}/w \ll 1$ の条件下で式(1)を式(2)に代入すると、MKS 単位系 (l [m], N_e [m^{-3}], B [T]) において式(3)が得られる。

$$\delta = 5.26 \times 10^{-13} \lambda^2 \int_{L_1}^{L_2} N_e B dz \quad (3)$$

偏光方向の回転を図1に模式的に示す。

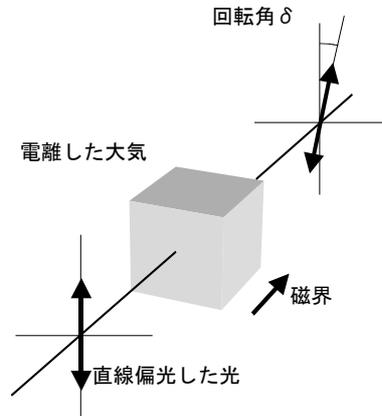


図1 ファラデー効果による伝搬光偏光面回転

ファラデー効果を雷放電計測に適用する場合、放電に伴う電子密度とパルス状の電磁界分布の変化が必要になる。

雷雲は雲底を正とする電荷をもつ。また、雲中放電は4-20回以上にわたりたて続に発生する。それによって大気中および雲中に電子-イオン対が生成され、電離度は放電近傍においては100%近くなる。また、放電電流が走ることで急峻な時間応答を伴う電磁場の変化、つまり電磁パルスが発生する。このような雰囲気中を直線偏光した光が伝搬する際にはファラデー効果によって偏光方向に回転が生じる。本研究では雲中放電を地上からのライダー観測で捉えることを目標としている。

4. 研究成果

(1) 放電実験結果

数値解析結果を検証するために伝搬光偏光面回転角の計測実験を行った。開放大気中において単一光路光学系を用いた実験を行った。

放電実験による検証は数値解析との照合や精度比較のみならず、ライダー開発においても重要となる。ライダー光学系の偏光消光比の検出精度や微弱信号光検出のためのダイナミックレンジの設定においても放電実験における装置構成がそのまま適用できる。

単一光路光学系を用いた放電実験

高圧ホールにて、公称電圧 1600kV のインパルス電圧発生器と単一光路光学系を用いて実験を行った。実験配置を図 2 に示す。ギャップ長 40~70cm の棒-棒ギャップ又は針-棒ギャップに正極性の雷インパルス電圧を印加し、火花放電を発生させた。直線偏光レーザー光を高圧電極近傍を通過させ、偏光ビームスプリッタによって直交する二つの偏光成分に分割してそれぞれを光検出器に入射し、これらの出力を差動増幅器によって 100 倍に増幅した。同時に、分圧器とロゴスキーコイルを用いて印加電圧と放電電流を測定した。

ギャップ長 50cm の針-棒ギャップに +800kV の雷インパルス電圧を印加した際に得られた差動増幅器の出力波形を図 3(a) に示す。図 3(a) において、①はレーザー光を遮断した場合、②はレーザー光を光検出器に入射した場合、①-②はその差分である。また、印加電圧および放電電流の波形を図 3(b) に示す。ここでは過電圧を印加したため波頭破壊により 721kV で火花放電が発生した。波形①-②と電流波形には強い相関が見られた。ここでは偏光回転角の定量化には至らなかったものの、本手法の有効性が示された。また、火花放電に伴う中性粒子密度変化に起因する光強度の変動は本測定には影響がないことが確認された。

次に、電磁ノイズの影響を低減するために受光系をシールドルームに収納して同様の実験を行った。実験の配置を図 4 に示す。ギャップ長 1m の棒-棒ギャップに雷インパルス電圧を印加して火花放電を発生させた。直線偏光レーザー光（波長 532nm）を接地電極の上方約 0.3m の位置を通過させ、偏光ビームスプリッタによって直交する二つの偏光成分に分割し、それぞれを増幅器を備えた光検出器に入射して各偏光成分強度の時間変化を測定した。直交偏光成分の出力は放電のない状態において共に 4.0V になるように調整した。また、電磁ノイズの影響を抑えるため、受光系および測定器は電磁シールドルーム内に設置した。放電路はショット毎に異なるため、レーザー光との位置関係を確認するために放電路を CCD カメラを用いて撮影した。

放電時における直交偏光成分の光強度の差分を求めた結果を図 5 に示す。また、放電なしで得た背景にギャップ位置におけるレーザー光のスポットと火花放電の発光を重ね合わせた画像を図 6 に示す。図 5 の波形 A~D は図 6 の画像 A~D に対応する。放電

路とレーザー光が交叉した場合 (A, C) に差分信号が現れ、放電路とレーザー光に離隔距離がある場合 (B, D) は差分信号がないことを確認した。直交偏光成分の出力は放電なしの状態において $I_p=I_s=4.0V$ 、放電時の波形 A, C において $I_s=4.075V$, $I_p=3.925V$ ($I_s-I_p=150mV$) であったことから、偏光面回転角は $d=p/4 \cdot \tan^{-1}[(I_s/I_p)^{1/2}]=0.54$ 度と推定された。数値解析では 2kA の放電電流を想定した結果、偏光面回転角は 0.2 度と見積もられた。本実験における最大電流値は 4kA であるため、この条件において数値解析結果は 0.4 度になる。実験的に得られた 0.54 度はこれに近い値であり、妥当な値であると言える。

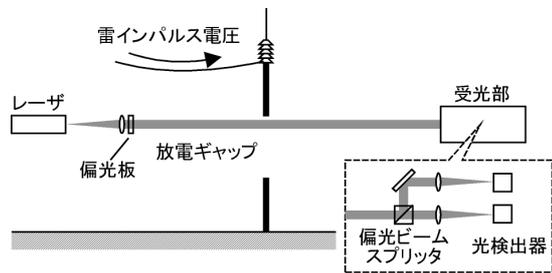


図 2 ギャップ放電によるレーザー光の偏光回転角を測定するための実験配置

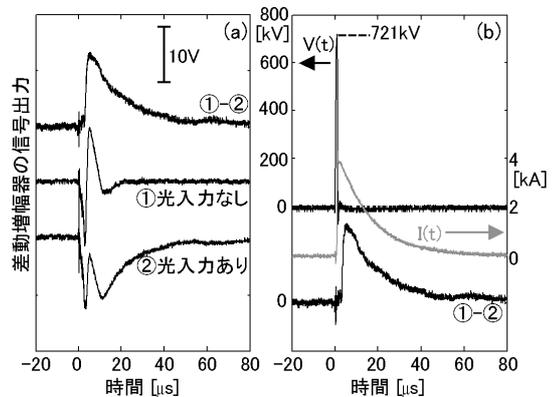


図 3 インパルス電圧印加時における (a) 直交偏光成分の強度差 (偏光回転角に比例), (b) 印加電圧波形, 放電電流波形との比較

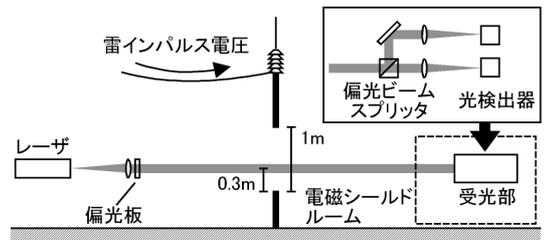


図 4 ギャップ放電によるレーザー光の偏光回転角を測定するための実験配置

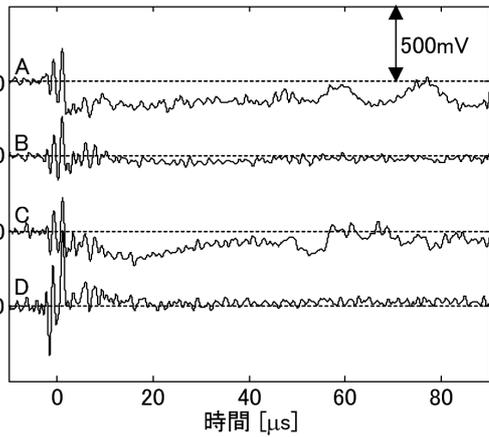


図 5 直交偏光成分の光強度の差分波形（波形 A～D は図 12 の画像 A～D に対応）

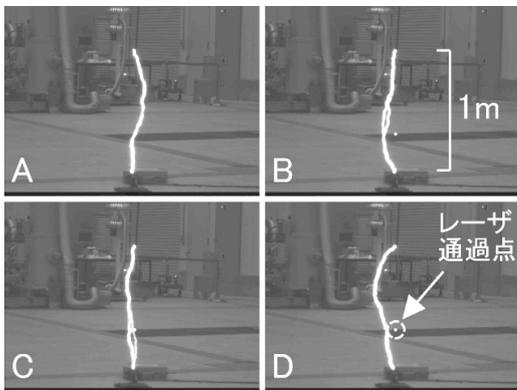


図 6 火花放電の発光画像（画像 A～D は図 11 の波形 A～D に対応）

(2) ライダー開発

基礎実験結果を踏まえ、偏光面回転角を測定するためのライダーの設計と製作を行った。数値解析から、放電に伴う偏光面回転角の計測には 30dB の偏光消光比をもつ光学系ならびに計測精度を持つ検出器が必要であることが分かったため、これらの必要条件を満たす送信光学系を設計、製作した。

ライダーは雷雲検知、雲間放電の位置評定を目的とするため、雲を計測対象とする。この場合、多重散乱の影響を排除するために狭い視野角が必要となる。よって、本研究では送受信に共通の光学系を利用するインライン型のライダーを採用した。本光学系は数 m の近距離から最大計測距離 20km まで 0.1mrad 以下の視野角を確保できる。

送受信光学系は光サーキュレータ、環状光生成光学系、送受信用望遠鏡、スキャナから成る。ライダーの概念図を図 7 に示す。光サーキュレータは 1/2 板(HWP)、グラッネラープリズム(GLP)、ファラデー回転素子(FR)、ミラー(M)から成る。これらの光学部品は偏

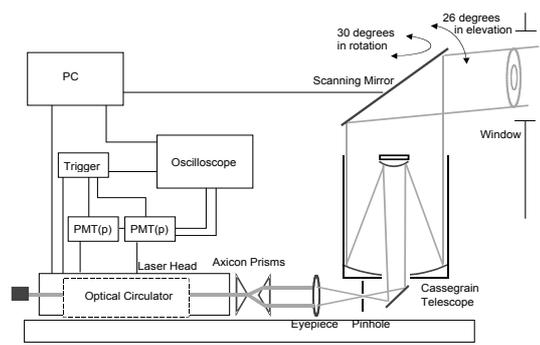


図 7 ライダーの概念図

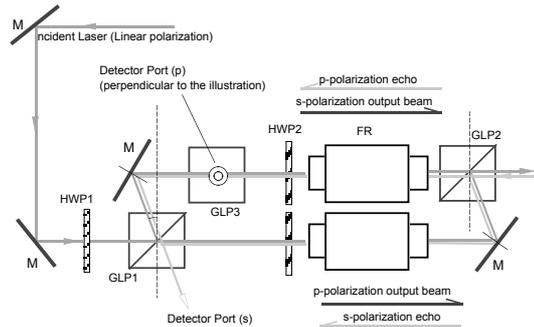


図 8 光サーキュレータの構成

表 1 光サーキュレータの送受信特性

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

光成分の高精度計測を実現するために耐光強度、透過率、偏光消光比に優れたものを使用している。図 8 に示すように、レーザー光は径 8mm、直線偏光で導入され、HWP1、GLP1 によって直交偏光成分 p 、 s の強度が等しくなるように分配される。その後 p 、 s 偏光成分は FR と HWP を通過し s 、 p 偏光成分となって出射側 GLP2 で合波される。一方、受信光は同光路を逆に進み、 p 偏光成分は GLP3 により取り出され（図 8 においては紙面に対して垂直な方向に取り出される）、 s 偏光成分は GLP1 によって取り出される。取り出した p 、 s 偏光成分はそれぞれ光電子増倍管 (PMT) を通してオシロスコープ等で測定される。

光サーキュレータの送受信特性は以下の通りである。送信における受信強度比は構成する光学部品の表面反射等で p 、 s 偏光検出ポートに到達するレーザー光（迷光）の強度であり、入射レーザー強度に対し 0.1%以下となっている。レーザー送信光の出射効率は約 80%であり、各光学素子の損失を考慮し

て妥当な結果となった。(表1参照)

環状光生成光学系は送信光を望遠鏡に入射した際に、望遠鏡副鏡からの正反射を防止するために送信光が副鏡部分にあたらないように環状とする機能を有し、アキシコンプリズム、アイピース、空間フィルタから成る。

送受信用望遠鏡は口径 280mm のシュミット=カセグレン型天体望遠鏡である。スキャナーは回転する平面ミラーで、送受信方向の仰角と方位角を変えるために用いる。設置場所における空間的制限から、仰角調整範囲は水平から 25 度まで、方位角の調整範囲は 30 度となっている。視野角は 0.177mrad である。

光サーキュレータの迷光強度はレーザー送信光強度の 0.1%以下となっているが、高強度のレーザーを用いた場合、PMT の過渡応答を引き起こすほどの光が入射してしまう可能性がある。この場合、受信信号が正しく測定されないため何らかの対策が必要となる。ここではゲート機能付き PMT を使用し、迷光の影響が完全になくなった時点で PMT に高電圧を印加した。レーザー出射から PMT へ高電圧を印加するまでの最短遅延時間は 200ns であり、この場合最短 30m の距離から受光信号が計測できる。

ライダーによって得られた受光信号の一

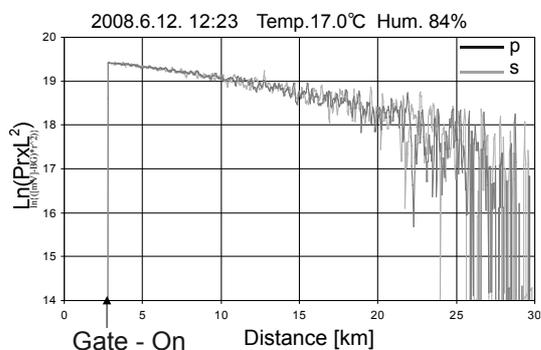


図9 ライダ受光信号の一例 (p 偏光)



図10 ライダー観測風景

例を図 9 に示す。ここではレーザー出射から PMT へ高電圧を印加するまでの遅延時間を設定し ("Gate On"で印加)、ライダー信号のダイナミックレンジを確保している。最近計測距離は 50m であった。Ps 両偏光成分をバランスとって射出しているため、図 9 のような晴天時には ps 両偏光成分のエコーが 20km の範囲に渡ってバランスよく受光されている様子がわかる。現在通年観測に向けて、長時間計測の安定化、ライダーエコー光解析の準備を進めている。

観測中の風景を図 10 に示す。画像右下から左上へ伸びている薄い直線がレーザーの光路である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- 1) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Precise measurement of polarization plane rotation of propagating beam due to atmospheric discharge", *Advanced in Geosciences*, (Accepted) [査読あり]
- 2) Tetsuo Fukuchi, and Tatsuo Shiina, "Measurement of rotation of polarization plane of laser radiation propagating through impulse discharge in air", *IEEJ Transactions on Electrical and Electric Engineering*, (Accepted) [査読あり]
- 3) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Optical measurement of high-voltage discharge in air for lidar lightning detection", *APLS The Review of Laser Engineering Supplemental Volume 2008*, Vol.36, pp.1279-1282, 2008 [査読あり]
- 4) 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測定", *電気学会論文誌 A 128 巻 7 号* pp.478-482, 2008 [査読あり]
- 5) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Evaluation of polarization angle rotation of propagating light in a partially ionized atmosphere under discharge conditions", *Electrical Engineers of Japan*, Vol.163, No.4, pp.1-7, 2008 [査読あり]
- 6) 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 [査読あり]

[学会発表] (計27件)

- 1) 馬木 大、野口和夫、福地哲生、宮本正和、椎名達雄、「高精度偏光計測用ライダーによる大気観測」、2009年電気学会全国大会、2009. 3. 17、(北海道大学)
- 2) 椎名達雄、野口和夫、福地哲生「豪雨落雷予測のための防災用ライダーシステムの開発」2009年レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会、2009. 1. 11、(徳島大学)
- 3) Tatsuo Shiina, Masakazu Miyamoto, Dai Umaki, Kazuo Noguchi and Tetsuo Fukuchi, "Fundamental MEasurement by In-line typed high-precision polarization lidar", *SPIE Asia-Pacific Remote Sensing 2008*, Vol.7153, pp.71530B-1 - 71530B-8, 2008.11.17 (New Caledonia - Noumea)

- 4) 椎名達雄、宮本正和、本田捷夫、馬木大、伊達聡、野口和夫、福地哲生、「雷検知を目的とした高精度偏光計測用インライン型ライダーシステムの開発ー基礎計測ー」第26回レーザーセンシングシンポジウム、2008.9.11、(福岡県朝倉市)
- 5) 福地 哲生、椎名 達雄、本田 捷夫、「大気中インパルス放電のレーザ偏光計測」第26回レーザーセンシングシンポジウム、2008.9.11、(福岡県朝倉市)
- 6) 宮本正和、椎名達雄、本田捷夫(千葉大学)、野口和夫、「高精度偏光計測用インライン型ライダーによる大気観測」、電気学会 電子・情報・システム部門大会、2008.8.21、(はこだて未来大学) Tatsuo Shiina, Masakazu Miyamoto, Toshio Honda, Takuya Kamiyama, Kyosuke Yashiro, Kazuo Noguchi and Tetsuo Fukuchi, "In-line Lidar for Detection of Lightning Discharge", The International Conference on Electrical Engineering 2008, pp.O-144-1 - 144-4, 2008.7.8. (Japan - Okinawa)
- 8) Tetsuo Fukuchi, Tatsuo Shiina, and Toshio Honda, "Measurement of impulse discharge in air using Faraday effect", The International Conference on Electrical Engineering 2008, pp.O-144-1 - 144-4, 2008.7.8. (Japan-Okinawa)
- 9) Tatsuo Shiina, Masakazu Miyamoto, Toshio Honda, Kazuo Noguchi and Tetsuo Fukuchi, "In-line typed high-precision polarization lidar", 24th International Laser Radar Conference, pp.79-82, 2008.6.24. (USA - Boulder)
- 10) 椎名達雄、本田捷夫、福地哲生:「高電圧インパルスジェネレータによる放電の伝搬光への寄与」、第55回応用物理学関係連合講演会、2008.3.27、(日本大学理工学部船橋キャンパス)
- 11) 宮本正和、椎名達雄、本田捷夫、神山拓也、矢代恭介、野口和夫、福地哲生:「高精度偏光測定用ライダーーシステム構成と諸特性ー」、第55回応用物理学関係連合講演会、2008.3.27、(日本大学理工学部船橋キャンパス)
- 12) 福地哲生、椎名達雄、本田捷夫:「ファラデー効果を用いた大気中インパルス放電計測」、2008年電気学会全国大会、2008.3.20、(福岡工業大学)
- 13) 椎名達雄、宮本正和、本田捷夫、神山拓也、矢代恭介、野口和夫、福地哲生:「雷放電検知用インライン型ライダーの開発」、2008年電気学会全国大会、2008.3.19、(福岡工業大学)
- 14) Tatsuo Shiina, Masakazu Miyamoto, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Optical measurement of high-voltage aerial discharge for lidar lightning detection", 6th Asia Pacific Laser Symposium, 2008.1.31.、(Japan - Nagoya)
- 15) 野口和夫、神山拓也、矢代恭介、宮本正和、椎名達雄、本田捷夫、福地哲生:「高出力レーザー用高精度偏光無依存型光サーキュレータ」、レーザー学会第28回年次大会、2008.2.1.、(名古屋国際会議場)
- 16) 椎名達雄、宮本正和、本田捷夫、福地哲生:「高圧放電の伝搬光偏光への作用とそのライダー応用」、計測自動制御学会第33回リモートセンシングシンポジウム、2007.11.8.、(千葉大学)
- 17) 椎名達雄、宮本正和、本田捷夫、福地哲生、野口和夫:「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ー計測原理とシステム設計ー」、第25回レーザーセンシングシンポジウム、2007.9.13.、(仙北市)

- 18) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "High-precision polarization lidar - lidar in-line optics -", CLEO Pacific Rim 2007, pp.1499-1500, 2007.9.29. (韓国 - Seoul)
- 19) 福地哲生、椎名達雄、本田捷夫:「大気中インパルス放電に伴う伝搬光偏光回転角の測定」、2007年電気学会A部門大会、2007.8.27.、(大阪府立大学)
- 20) Tatsuo Shiina, Masakazu Miyamoto, Toshio Honda, Tetsuo Fukuchi, Kazuo Noguchi, "Precise Measurement of Polarization Plane Rotation of Propagating Beam Due to Atmospheric Discharge", AOGS2007 Asian Lidar Conference, 1197-1-1197-2, 2007.7.31. (Thai -Bangkok)
- 21) 椎名達雄、本田捷夫、福地哲生:「大気中高電圧放電による伝搬光偏光面回転角の測定」、第54回応用物理学関係連合講演会、2007.3.28.、(青山学院大学相模原キャンパス)
- 22) 宮本正和、椎名達雄、本田捷夫、福地哲生、野口和夫:「高精度偏光測定用ライダーー送信光学系の設計と製作ー」、第54回応用物理学関係連合講演会、2007.3.28.、(青山学院大学相模原キャンパス)
- 23) 椎名達雄、本田捷夫、福地哲生:「大気中高電圧放電下における伝搬光偏光回転角の評価」、2007年電気学会全国大会、2007.3.17.、(富山大学)
- 24) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Examination of Lidar Lightning Measurement", SPIE Asia-Pacific Remote Sensing, Vol.6409, pp.64090Y-1-9, 2006.11.15. (India - Goa)
- 25) 椎名達雄、田中 裕、本田捷夫、「インライン型ライダーによる雷計測の検討」第24回レーザーセンシングシンポジウム、2006.9.12.、(鴨川市)
- 26) 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」、2006年電気学会A部門大会、2006.8.21.、(熊本大学)
- 27) Tatsuo Shiina, Toshio Honda, and Tetsuo Fukuchi, "Rotation Angle Measurement of Proceeding Beam Polarization under High-Voltage Discharge", Reviewed and Revised Papers presented at the 22th International Laser Radar Conference, Part I, pp.87-90, 2006.7.26. (Japan - Nara)
- [図書] (計0件)
[産業財産権]
○出願状況 (計0件)
○取得状況 (計0件)
- [その他]
ホームページ等
<http://berno.tp.chiba-u.jp/>
6. 研究組織
(1)研究代表者
椎名 達雄 (SHIINA TATSUO)
千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授
研究者番号: 80304187