

インライン型ライダーによる雷計測の検討 Lightning Measurement by In-line type Lidar

椎名 達雄、田中 裕、本田 捷夫

Tatsuo Shiina, Yu Tanaka, and Toshio Honda

千葉大学工学部

Faculty of Engineering, Chiba University

Abstract

Change of rotation angle of linearly polarized light propagated into the atmospheric plasmas is caused by Faraday effect. It was calculated by the electro-magnetic field model on return stroke current discharge. In the calculation, the isolation ratio of the authogonally polarized echoes on our in-line type lidar system was also considered to assess the possibility of its detection. The result was positive for the in-line lidar system, while it suggested the improvements of the present lidar system, i.e., the isolation ratio and Signal-to-noise ratio.

1. はじめに

従来より雷の計測は放電に伴う電磁波をアンテナで捕らえる手法が用いられてきた。広域を測定範囲とすることができる反面、放電位置特定のためには同期した複数の観測場所 / 装置を用意する必要がある。計測制度を向上するためには多くの基地局を網の目上に敷設する必要がある。

本研究ではこれまで集中豪雨、落雷予測を目的としたライダーシステムの開発を行ってきた。開発したインライン型ライダーは狭い受信視野（0.1mrad）で送受信視野が常に重なることで最近距離から（0-100m～）の計測範囲を持ち、かつ p, s 両偏光成分の同時計測といった特徴をもつ。併せて伝搬光は環状ビームで自己収束する。生成される非回折ビームは大気揺らぎに強い。低空の雨雲・雷雲下層部で球状雲粒子（雨粒）と識別した氷晶の検出が可能であり、その動きをモニターすることで、豪雨や落雷につながる気流の変化、前兆の導出を目指している。現在継続的な観測を行い、統計解析のためのデータ収集を行っている。

しかし、氷晶のモニターは冬季が中心となり、夏場の低い雷雲（<1km）での計測は難しい。また、氷晶による豪雨や落雷の予測は間接的なものであり、それら災害事象と氷晶計測との因果関係を検証するためには季節や地域といったさまざまな気象要因を考慮した上での比較が不可欠である。より直接的な計測が望まれる。そこで放電によって生成される大気イオンが満ちた大気空間を光が伝搬する際、同じく放電による電磁場の変化によって偏光方向が回転するファラデー回転に着目した。特にインライン型ライダーで計測することを念頭に、その検出のための条件を検討した。

2. 測定原理

電離したプラズマ中を磁場 B に平行に伝搬する光の偏光方向は回転する。これはファラデー効果（ファラデー回転）として知られる。回転角の大きさは電子密度と磁場成分の積に比例する。今電離したプラズマ中を磁場 B の方向へ伝搬する直線偏光した光（波長 λ 、振動数 $\omega = 2\pi c / \lambda$ ； c は光速）を考える。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 は次式で与えられる。¹⁾

$$n_{\pm} = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \frac{\omega}{\omega \pm \omega_{ce}} \right)^{1/2}$$
$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{en_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad \omega_{ce} = \frac{eB}{m_e}$$

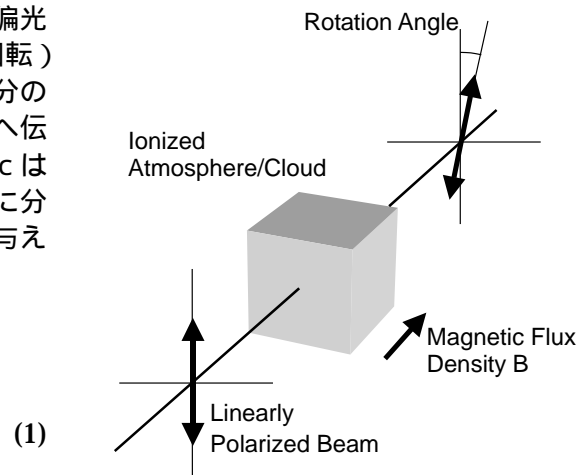


Fig.1 Faraday Rotation.

ここで、 ω_{pe} 、 ω_{ce} はそれぞれプラズマ周波数、およびサイクロトロン周波数である。 e は電子の電荷、 m_e は電子の質量、 ϵ_0 は誘電率を表す。 n_e は電子密度である。したがって距離 L ($=L_1-L_2$) を伝搬する際の偏光方向の回転角は次式で得られる。

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\pi}{\lambda} \int_{L_1}^{L_2} (n_+ - n_-) dz \\ &= 2.62 \times 10^{-13} \lambda^2 \int_{L_1}^{L_2} n_e B dz\end{aligned}\quad (2)$$

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。

3. ファラデー回転角の見積り

(i) 雷放電のモデル化と電磁界分布の変化

雷雲は一般に雲底を負とする電荷をもつ。また、雷放電は 4 - 20 回以上たて続けに発生する。それによって本来電氣的に絶縁された大気・雲中に電子・イオン対 (NO_x 等) が生成されることになる。1 回の放電に対し、数 - 数十 $\times 10^{26}$ 分子の NO_x が生成される。²⁾特に放電近傍の気中では電離度は 100% となる。電離したプラズマ中を放電電流が流れることで衝撃波 (急峻な時間応答を伴う電磁界の変化) が生成される。そのような雰囲気中を偏光した光が伝搬する際、前章での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が、本報告では解析モデルを簡素化し、対地 - 雲底放電の帰還電流による電磁界変化の見積りとそれによる伝搬光の偏光方向回転角の見積りを行い、インライン型ライダーで計測できる可能性について検討した。

解析には Uman 等による帰還放電による電磁界モデルを用いた。^{3) - 5)} 放電と観測位置との配置を Fig.2 に示す。帰還放電電流はブレークダウンパルス電流、定常電流、ならびにコロナ電流とで構成される。パルス電流は速度 10^8m/s で地上より雲底に向けて上昇する。パルス電流、コロナ電流は地上より上昇するにつれ減衰する性質をもつ。典型的な帰還放電電流の観測を元に計算された地上での帰還放電電流の時間変化を Fig.3 に示す。また、Fig.4 は放電電流の各成分の伝播の様子を表している。帰還放電電流によって生じる電磁界の変化は次式によって表される。

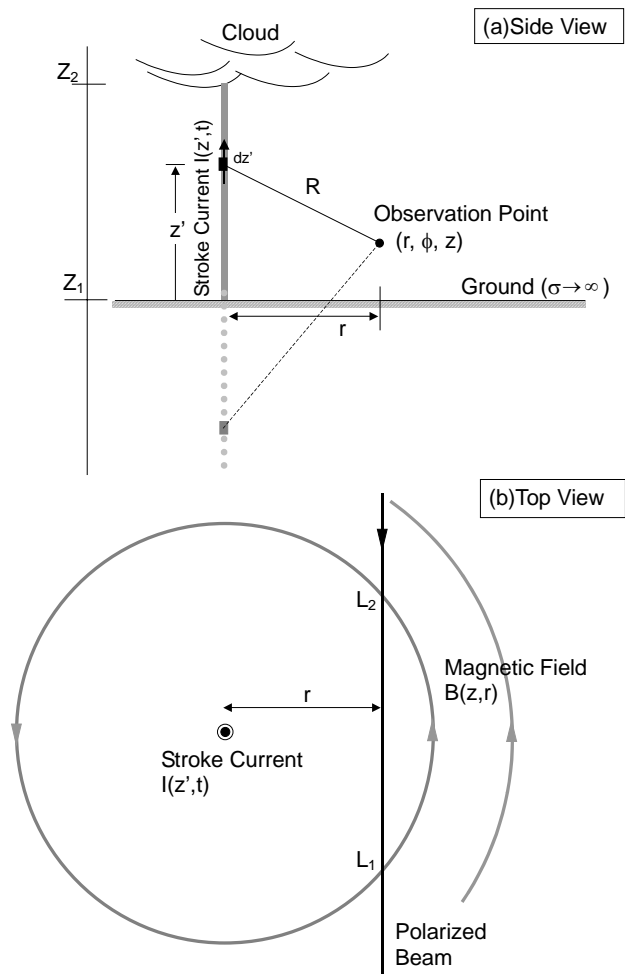


Fig.2 Electro-magnetic field analysis.

$$\begin{aligned}\vec{E}(r, \phi, z, t) &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_{z_1}^{z_2} \frac{2(z'-z)^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' \right. \\ &\quad \left. + \int_{z_1}^{z_2} \frac{2(z'-z)^2 - r^2}{cR^4} i(z', t - R/c) dz' - \int_{z_1}^{z_2} \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] \\ \vec{B}(r, \phi, 0, t) &= \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_{z_1}^{z_2} \frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) dz' + \int_{z_1}^{z_2} \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right]\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、 μ_0 は透磁率、 $i(z',t)$ は帰還放電電流、 r は放電路 - 観測点間距離、 R は観測点 - 電流源 dz 間距離である。

この電磁界分布の変化が大気プラズマ中に衝撃波を生成させる。解析結果の一例を Fig.5 に示す。放電路 観測点間距離 20m-1km、観測点を地上-3km 上空と仮定して、大地 雲底間距離 7.5km の場合の磁界強度の変化を表している。電界の変化を同時に算出しているが電界強度が、高度 1km でパルス状の波形が伝搬することを確認している。伝搬光のファラデー効果を評価する際、必要なのは磁界強度の変化である。電界の変化に比べると磁界のパルス状変化は緩慢である。それでも観測点 $r=20m$ で磁界強度は $10^{-4}[Wb/m^2]$ の大きさとなる。図より、磁界強度の大きさは放電路 - 観測点距離 r に依存する様子がわかる。ライダーでの観測では伝搬光を直接観測対象へ撃ち込むことができ、かつ大気・雲各位置からのエコーを時間分解して計測できるため、放電路近くでの詳細な観測が見込める。

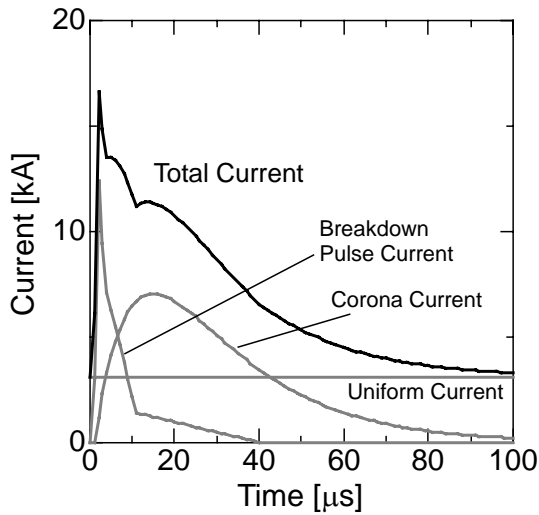


Fig.3 Return stroke current components.

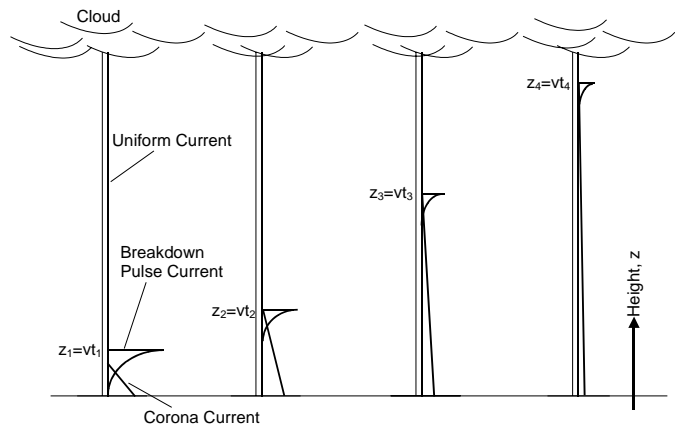


Fig.4 Current distribution of return stroke.

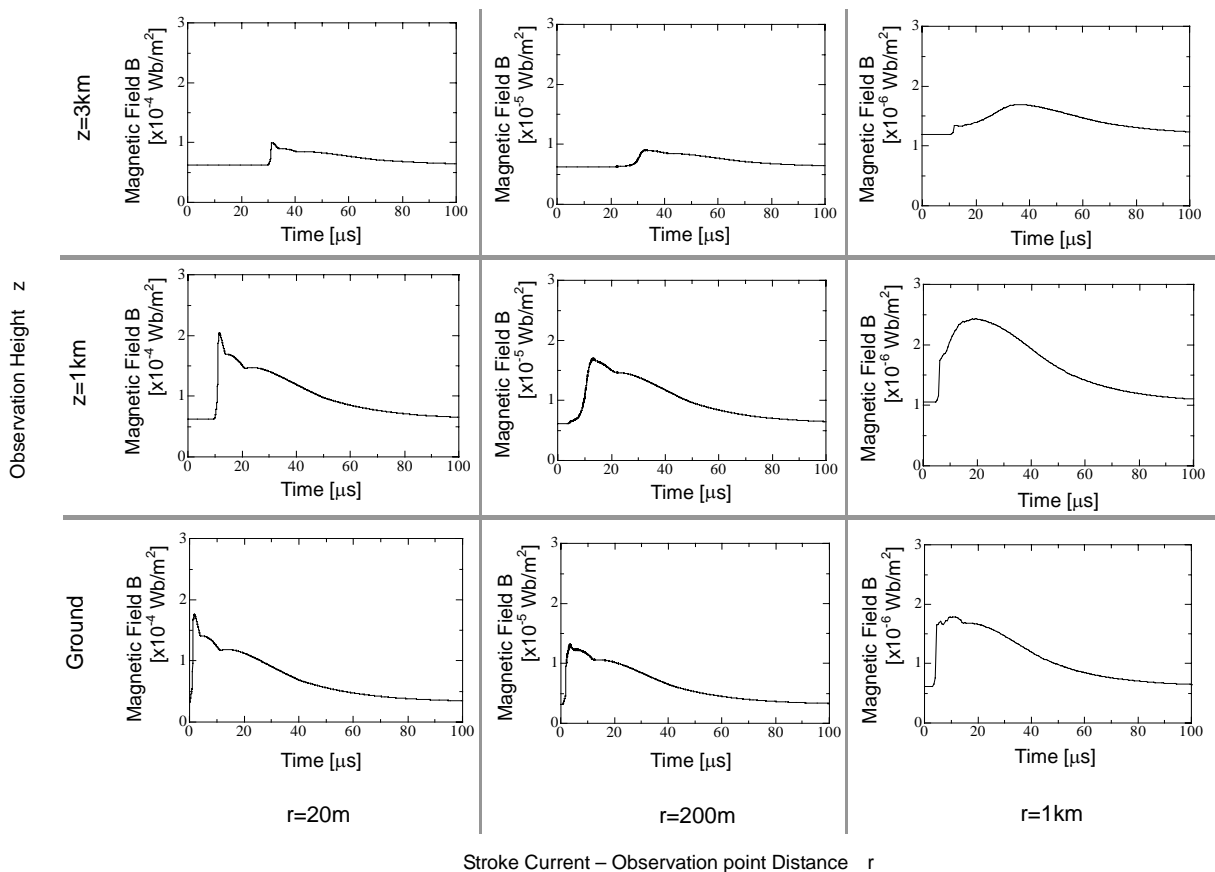


Fig.5 Calculated magnetic field($r=20m - 1km$, $z=ground - 3km$, $z_2-z_1=7.5km$).

(ii) 偏光方向回転角の見積もり

これまでの解析によって得られた電磁界分布の変化をもとに伝搬する直線偏光の偏光方向回転角を計算した。計算条件を Table 1 にまとめる。電子密度最大値は気中放電によって発生する電子・イオン対が 100% 電離した場合を仮定している。磁束密度は先の電磁界分布の変化から放電電流に近い場所 ($r=20\text{m}$) での最大値を用いた。ライダー送信光を雲中放電箇所に入射させた場合を想定している。入射させるレーザービームは帰還電流と垂直 (大地に対して水平) にあるものとし、ライダー観測時にはエコ光を受光するため伝搬距離は 2 倍となる。

Table 1. Cloud Plasma and incident light condition.

Electron Density n_e	$10^{21}\text{-}10^{26} [\text{m}^{-3}]$
Magnetic Flux Density B	$2.0 \times 10^{-4} [\text{T}]$
Wavelength of Incident Light	$1\mu\text{m}$
Propagation Distance L	1km
Distance between Ground and Cloud Base	7.5km
Distance between Discharge Path and Observation Point r	20m

以上の条件で式(1)、(2)から偏光方向回転角を算出した結果、 $n_e=10^{21}[\text{m}^{-3}]$ の弱電離プラズマの状況下では 0.1mrad となった。インライン型ライダーの p s 偏光成分のアイソレーションは 20dB 程であるため、現状のシステムでは検出が難しい。⁶⁾ $n_e=10^{26}[\text{m}^{-3}]$ の強電離プラズマの状況下では 10.48rad となり、大きな回転角を得る。p s 偏光成分のアイソレーション 20dB を基準とした場合、放電路 - 観測点間距離 $r = 20\text{m}$ としたときの検出限界を与える回転角は 10mrad となり、その時の電子密度は $10^{23}[\text{m}^{-3}]$ と算出される。同様に、先の強電離プラズマ ($n_e=10^{26}[\text{m}^{-3}]$) 下での検出限界を与える磁束密度 B は $10^{-7}[\text{T}]$ となり、その際の放電 - 観測点間距離 r は 10km と見積もられる。大気中を伝搬する衝撃波の速度は音速 (400m/s) 程度であり、⁷⁾⁸⁾ かつその時間応答は先の磁界強度の変化から $10\text{-}50\mu\text{s}$ である。数 kHz のパルス繰り返し周波数を持つ LD 励起のパルスレーザーであれば大気中を伝搬する直線偏光回転角の変化を 2(3)次元分布として捕らえることが可能となる。その際回転角検出精度はパルス光強度には依存しない。また、実測では氷晶による偏光解消効果と回転角の変化とを識別する必要があるが、p s 両偏光成分の波形処理による識別を検討する。

4. まとめ

従来より電磁界測定によって捕らえられてきた雷・放電計測をライダーで計測することの可能性を検討した。ライダー、特にインライン型ライダーで計測するメリットは単一の基地局から大気電子密度、ないしは磁束密度を時間/空間分布として計測が可能であることにある。本報告ではオーダーエスティメーションとして対地 - 帰還放電を用いたが、落雷の予兆を捕らえるためには雲中放電を考慮しなければならない。また、計算では電子密度、磁束密度を固定して偏光回転角の算出を行ったが、実際にはそれらの値は位置と時間の分布をもつ。実際の雲中雲下の電離量推定も不可欠である。今後具体的な状況設定の下で解析を進めていく予定である。

本研究でのインライン型ライダーを偏光回転角の測定に用いる場合、SN 比の改善、アイソレーションの向上が必要になる。前者に関しては信号処理の強化、後者に関しては計測される p s 両偏光成分の波形処理により改善を計る予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本大気電気学会編、大気電気学概論、第 2 章、コロナ社、2003
- 3) Y. T. Lin, M. A. Uman, and R. B. Standler, J. Geophys. Res., Vol.85, No.C3, pp.1571-1583, 1980
- 4) M. J. Master, M. A. Uman, Y. T. Lin, and R. B. Standler, J. Geophys. Res., Vol.86, No.C12, pp.12.127-12.132, 1981
- 5) M. A. Uman, J. Geophys. Res., Vol.90, No.D4, pp.6121-6130, 1985
- 6) T. Shiina, K. Yoshida, M. Ito, and Y. Okamura, Applied Optics, in print.
- 7) 福地 哲生、根本 孝七、松本 宏司、細野 美樹、電気学会論文誌 A、125 巻 2 号、pp.113-118、2005
- 8) 福地 哲生、静電気学会誌、28 巻 6 号、pp.284-290、2004