落雷のビデオ写真を利用した雷撃角発生頻度の3次元分布の推定*

竹内利雄 (愛知産業大学造形学部) **橋本孝明 (愛知技術短期大学自動車工業学科) ***
高木伸之 (岐阜大学工学部) ****葛城幸男、清水雅仁 (中部電力電力技術研究所) *****

Abstract. Three dimensional occurrence distributions of angles of ground discharge channel from a vertical line through the front end of the channel are estimated by both statistical analysis on video pictures of the ground discharge and consideration on three dimensional ground discharge models. It is concluded that the standard deviations of the angles are about 25 to 35 % larger than the values obtained from only two dimensional analysis on the video pictures.

1. まえがき

送電線や鉄塔への、落雷による被害を防ぐための一つの手段は、この様な構造物への落雷のシミュレーションを行い、落雷の様相を把握し、適切な防護対策を立てることである。我々はすでにビデオカメラで撮影した多数の夏季落雷の写真を利用して、自然落雷の2次元シミュレーション・モデルを開発し、送電線や鉄塔への落雷の議論に利用しているが(竹内他、1992、1993a、1993b、1993c)、さらにこのモデルの3次元への拡張を計画している。このためには、数キロメートル離れた2地点にカメラを設置し、落雷のステレオ写真を多数撮って、この写真をもとに3次元モデルを開発することが理想であるが、落雷のステレオ写真を統計的に議論ができるほど撮るのには、非常に多くの費用と日時を要する。そこでさしあたり、2次元の写真を使用して近似的な3次元モデルができないかと考えた。電光写真から落雷のモデルを開発するのに必要なパラメータはいくつかあるが、ここではまずモデル開発の第1段階として、雷撃角の発生頻度分布について考察を行う。

2. 考察の方針

考察を進める大前提として、落雷発生確率は、雷撃角0度、即ち鉛直放電の場合が最大で、雷撃角の増加とともに正規分布の形で減少すると仮定する。具体的には、落雷発生頻度分布の雷撃角標準偏差が、14、16、18、20、22、24、26、28、30度の9種類の分布を仮定した。この9種類の分布のそれぞれについて、後で述べる方法で、見かけ上の雷撃角と落雷発生頻度の関係を計算し、それぞれの計算された分布を正規分布と仮定して、落雷発生頻度に対する見かけ上の雷撃角の標準偏差を計算する。

---

* Three dimensional estimation on occurrence distributions of angles of ground discharge channel from a vertical line with video pictures of discharges.

** Tosio Takeuti, Aichi Sangyo Univ., Faculty of Design and Archit., Okazaki, 444, Japan.

*** Takaaki Hashimoto, Aichi College of Tech., Dept. of Automotive Eng., Gamagori, 443, Japan.

**** Nobuyuki Takagi, Gifu Univ., Faculty of Eng., Gifu 501-11, Japan.

***** Yukio Katsuragi and Masahito Shimizu, Electr. Power Res. and Development Center, Chubu Electr. Power Co., Ohdaka, Nagoya, 459, Japan.

つぎにビデオカメラで撮られた落雷の写真から、見かけ上の雷撃角と落雷発生頻度の関係を調べ、この関係を正規分布で近似し、見かけ上の雷撃角の標準偏差を計算する。この見かけ上の雷撃角の標準偏差と、さきに導きだした9種類のモデルに関しての見かけ上の雷撃角の標準偏差を比較し、両者の値が一致するモデルを実際の雷現象を示すモデルとする。

3. 落雷モデルから見かけ上の雷撃角に対する落雷発生頻度を算出する方法

仮定した落雷モデルから、見かけ上の雷撃角に対する落雷発生頻度を算出するために、つぎの二つの仮定を導入する。(a) 放電路の出発点を通る鉛直線はカメラのレンズの光軸と交わる。(b) 放電路の終点とカメラレンズを結ぶ直線が、レンズの光軸と平行であると見なすことができる程度に遠くで発生した落雷とする。なお本論文では、仮定(a)と(b)を採用したことにより発生する誤差は、それぞれおよそ10%以下であると見積られるので、誤差についての議論は省略する。

第1図に見かけ上の雷撃角と、それに対応した落雷頻度分布の計算方法の原理を示す。放電路の出発点Sを通る鉛直線と直交する平面Pを定め、Pと鉛直線の交点Oを通り、レンズの光軸と直角な直線Rをひく。落雷放電路と鉛直線の間の角度が雷撃角 θ であり、 $\theta=5$ 度、10度、 $\dots$ 85度と5度毎にとった17個の落雷放電路に対応した直線を、図の様に出発点SとR上の終点との間に引く。つぎに平面P上に、Oを中心として、それぞれの θ に対応した落雷放電路とRとの交点を通る半円を描く。それぞれの半円で囲まれた環状領域を図に示す様に、領域A、B、 $\dots$ P、Qと呼ぶことにする。またレンズの光軸と平行で、それぞれの半円とRとの交点を通る直線a、b、 $\dots$ p、qを引くと、これらの直線は、それぞれビデオ写真上の見かけ上の雷撃角5度、10度、 $\dots$ 85度に対応することになる。

落雷はそれぞれの環状領域の中で一様な分布で発生するものとする。すなわち、それぞれの領域の中心、たとえば領域Fでは、 $\theta=27.5$ 度に対応した点線で描かれた円周の上で等確率で発生するものとする。したがって、領域Fで発生した落雷のうち、見かけ上の雷撃角が

Fig.1. Diagram for estimation of occurrence frequencies of ground discharge corresponding to each apparent angle between the channel and the vertical line through the front end of the channel.

15度から20度の間の落雷数は、この円周が直線cとdで切られる円弧をOから見た角の2倍に比例することになる。この方法で、例えば、見かけ上の雷撃角が15度から20度の間に含まれる全落雷数は、直線cとdとの間に挟まれるすべての環状領域内の円弧により決定される角度にそれぞれある係数をかけたものを、全部加算すればよい。このようにして、それぞれの見かけ上の雷撃角の間の落雷数を計算することができる。

4. 落雷モデルからの計算結果とビデオ写真からの実測結果との比較

上の9種類のモデルについて、見かけ上の雷撃角と落雷発生頻度の関係を計算した結果を、第2図の様に累積正規分布用のグラフの上に書き入れて見ると、それぞれの分布は直線から少し外れるが、これを直線とみなす。すなわちおおよそ正規分布に近いと見なすことにする。

Fig.2. Relationship between the apparent angles of the ground discharge channel from the vertical line and occurrence frequencies of the discharge corresponding to the apparent angles for the nine models. The numbers in the figure indicate the standard deviations of real angles of the channels for each model. The vertical scale is the cumulative normal distribution.

一方、我々は岐阜県瑞浪市の山中で、1991年と1992年の2年間に、約110個の落雷をビデオカメラで撮影した。これらの落雷の写真をそれぞれ第3図の様に、落雷放電路を上、中、下に3等分し、各々の部分について、見かけ上の雷撃角と対応した落雷数の分布を調べ、第4、5、6図の様なヒストグラムを得た。これらの分布を、図の中に記入してある様に正規分布で近似し、さらにそれぞれの標準偏差を計算した。なお図中の正規分布曲線がなめらかでないのは、落雷数を4捨5入により自然数に変えたためである。

Fig.3. Three portions of a ground discharge channel (dotted line) and angles of the channel.

Fig.4. Relationship between apparent angels and the occurrence distribution of the corresponding ground discharges for the upper portion of channel. (Standard deviation, 20°)

Fig.5. Same as Fig.4 but for the middle portion of channel. (Standard deviation, 16°)

Fig.6. Same as Fig.4 but for the lower portion of channel.
(Standard deviation, 15°)

ふたたび第2図に戻る。縦軸の標準偏差を示す目盛32を通り横軸と平行な直線を引き、それぞれの落雷モデルの曲線とこの直線との交点の横軸の座標値を読めば、これが、それぞれの落雷モデルに関する見かけ上の雷撃角の標準偏差になる。このようにして得られた落雷モデルの標準偏差が、第4、5、6図に示してある、ビデオ写真の実測値から導き出した見かけ上の雷撃角の標準偏差20度、16度、15度と一致する落雷モデルは、標準偏差26度、20度、20度のモデルであることが第2図から推測できる。

5. 議論を進めるための前提に関する考察

この論文で議論を進めるために提案した大前提は、実際の落雷では、鉛直な落雷が最も多く発生し、雷撃角の増加とともに、落雷数が正規分布の形で減少するということである。この仮定は正規分布が多くの自然現象とよく一致し、しかも鉛直な落雷が多いという経験則にもとづいた仮定であり、不自然でない仮定であると考えられる。

たとえば、雷撃角が0度から40～50度まで落雷発生頻度が等しく、それより大きい雷撃角では落雷は発生しないという仮定のもとに、見かけ上の雷撃角と落雷発生頻度の関係を計算してみると、ビデオ写真から導き出した実測結果と非常によく一致する。しかしこのような仮定は、自然現象としての落雷を議論するにはふさわしくないと考えられるので、ここでは採用しない。

6. まとめ

落雷の放電路を上中下に3等分して、それぞれ、雷撃角に対する落雷発生頻度分布を3次元的に導きだしてみた結果、雷撃角の標準偏差は、放電路の上中下でそれぞれ26度、20度、20度となった。すなわち上部では、雷撃角の標準偏差が中部と下部の偏差に比べて6度大きかった。また3次元解析から導きだした雷撃角の標準偏差と、ビデオ写真にもとづく2次元解析から導きだした見かけ上の雷撃角の標準偏差との間には4～6度の差、すなわち約25～35%

の誤差が現れた。この結果を落雷の3次元モデルを開発するときに参考にしたい。

落雷の2次元写真から3次元的考察を行うためには、各種の仮定を導入する必要があった。すなわち、落雷発生頻度が雷撃角の増加とともに正規分布で減少するという仮定に加えて、第3章の始めに導入した放電路とカメラレンズの位置関係に関する仮定、さらに、各種の計算結果や観測結果が正規分布で近似できるという仮定を導入した。これらの仮定を導入したことに起因する誤差についての議論は省略した。

最後に岐阜県瑞浪市で落雷のビデオ写真を撮るために協力して頂いた、岐阜大学工学部電子情報工学科有馬教授と、有馬研究室所属大学院生および卒業研究学生の諸君に深く感謝いたします。

参考文献

- 竹内利雄、橋本孝明、高木伸之、ステップドリーダの計算機シミュレーション、電気学会放電高電圧合同研究会資料、HV-92-22、1~6、1992。
- 竹内利雄、橋本孝明、高木伸之、Two dimensional computer simulation on the natural stepped leader in summer, J. Atmos. Electr., 13, 9~14, 1993a.
- 竹内利雄、橋本孝明、高木伸之、A computer simulation on lightning stepped leader striking to towers, 8th International Symposium on High Voltage Engineering, Proceedings, 3, 265~267, 1993b.
- 竹内利雄、橋本孝明、高木伸之、葛城幸男、清水雅仁、鉄塔への落雷の2次元計算機シミュレーション、電気学会放電高電圧合同研究会資料、HV-93-64、7~15, 1993c.

(Received February 9, 1994;
Revised April, 14, 1994;
Accepted April 21, 1994.)