ロケット誘雷により引き起こされる 帰還雷撃放電路の線路定数

正員 高木 伸之 (名古屋大)

正員 竹内 利雄 (名古屋大)

正員 仲井 猛敏 (名古屋大)

1. ま え が き

雷は電力系統での事故の主要な原因の一つであり、例えば 500kV 送電線の事故の 90% は雷によるものであるという報告がある⁽¹⁾。また雷による送電線の多相多回線事故の発生機構はまだよく分かっていない。更に通信回線など電力以外の分野でも雷害の問題が存在している。これらの事故を防止するための対策を立てるためには、雷害の様子を調査すると同時に雷放電現象そのものを解明しなければならない。この雷放電現象の中で最も大きな被害をもたらすのは帰還雷撃であり、電力系統や通信回線のより確かな耐雷対策を行なうためには帰還雷撃の特性を知ることが必要である。

帰還雷撃の特性を表現する方法の一つに伝送線モデルがある⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾。このモデルは帰還雷撃を分布定数回路で表現するため応用面での放電路の取り扱いが簡単にできる。例えば送電線に落雷があったときの送電線を流れる事故電流を計算する場合や、すぐ近くで起きた落雷による配電線への誘導電圧を計算する場合などに大変有用である。しかし、伝送線モデルに関して今までに発表された論文⁽²⁾⁻⁽¹⁰⁾では落雷電流の放電路内での伝搬特性については詳しく議論されておらず完全なモデルとして確立されていない。そこで我々は、帰還雷撃放電路の発光強度変化の高さによる違いの測定結果から放電路の周波数特性を求めることを試みた。更にその周波数特性より放電路の線路定数を求めた。

線路定数を求めるのに使用したデータは、昭和 57 年冬期石川県で行なわれたロケット誘雷によるものである。この結果を自然雷や他のトリガー雷（上向きの放電で始まる雷；例えば冬季の日本海側での高い送電鉄塔への落雷）にも適用できるかどうか合わせて検討を行なった。

2. 雷放電の光学的観測

〈2・1〉 観測方法 我々は雷放電による発光の強度測定ほかに、雷放電過程を調べるために電界変化、磁界変化を同時に測定している。電界変化測定には通常スローアンテナ（帯域 0.016Hz~1kHz）、ファーストアンテナ（160Hz~1MHz）と呼ばれている測定器を用いた。どちらも地上から約 50cm の高さに大地と水平に置かれた直径 30cm の円板とその直下に取り付けられた増幅器から成っていて地上近傍の電界変化を測定する⁽¹¹⁾。落雷による磁界変化は直径 45cm の 1 回巻きループアンテナでピックアップされ、更に差動増幅して帯域 1MHz のテープレコーダに記録される。

我々が用いた光学観測システムを図 1 に示す。放電路は焦点距離 50mm ($f=1.4$) の対物レンズを通して半透明のスクリーン上に像を結ぶ。この像はビデオカメラで撮影されビデオテープレコーダ (V.T.R.) に記録される。スクリーン上には受光面が 1.2mm×29mm のシリコンフォトダイオード 2 本が平行に埋め込まれており、放電路からの光を電気信号に変換して 2 チャネルのテープレコーダに記録している。フォトダイオードの 1.2mm の幅は視野 1.4° に相当し、この角度は水平距離 1.5km 先で発生した、大地に垂直な放電路の場合 36m の長さになる。詳細は文献⁽¹²⁾、⁽¹³⁾に記述されている。以後、放電路の下側を見てい

Line Constants of the Return Stroke Channels of Lightning Triggered with Rockets. By Nobuyuki Takagi, Member, Toshio Takeuchi, Member & Taketosh Nakai, Member (The Research Institute of Atmospherics, University of Nagoya).

高木伸之：正員，名古屋大学空電研究所
竹内利雄：正員，名古屋大学空電研究所
仲井猛敏：正員，名古屋大学空電研究所

図1 雷放電路用光学観測システム

Fig. 1. The optical observation system for a lightning discharge channel.

図2 対地雷撃による電界変化 E 、磁界変化 B 、発光強度変化 P の波形の一例

Fig. 2. An example of recorded signals of electric field change E , magnetic field change B and light intensity P radiated from a ground stroke triggered with rocket.

るフォトダイオードの出力を P_{low} 、上側の出力を P_{high} とする。

〈2・2〉観測結果 図1のシステムを用いた雷の観測は昭和56年12月から59年2月までに夏2回、冬3回の計5回それぞれ約2ヶ月間行なわれた。57年12月の観測はロケット誘雷実験に参加した。ロケット誘雷による観測では落雷が起きる場所と時間があらかじめ明らかにされるため、効率のよい観測ができ多くのデータが得られた。

図2にロケット誘雷による対地雷撃の一例を示す。各波形は上から電界 E 、磁界 B 、発光強度 P_{high} および P_{low} の時間変化である。電界変化は通常の落雷と同じ先駆放電-帰還雷撃の過程を示している(図中の1は先駆放電、 r は帰還雷撃を示す)。帰還雷撃の後には M -変化と呼ばれるフック形の電界変化(図中の m)が見られる⁽¹⁴⁾。磁界変化と発光強度変化波形には電界変化の場合ほど前駆放電ははっきりとは現れていないが、帰還雷撃および M -変化は電界変化に対応してはっきりと現れている。発光強度変化において P_{high} は P_{low} より立ち上がりの急い部分急い部分が小さくなっていることがわかる。

他の発光強度変化の観測例を図3に示す。すべてトリガー雷によるものであるが、(a)は煙突への落雷を距離1.0 kmで、(b)、(c)はロケット誘雷による落雷を距離1.5 kmの地点で記録したものである。雷撃(a)では、 P_{high} は P_{low} に比べ最初のピーク α が後続のピーク β に対して相対的に小さくなっている。雷撃(b)は立ち上がりが P_{low} に比べ P_{high} の方がいくぶんゆるやかである。雷撃(c)は(a)、(b)と異なり立ち上がりがゆるやかである。(c)のようなタイプの

図3 発光強度変化の波形例

Fig. 3. Examples of variation in light intensity with time.

雷撃はトリガー雷でよく発生し、対応する電磁界変化も発光強度変化と同様に急しゅんな立ち上がりを示していないものもある⁽¹⁵⁾。電磁界及び発光強度変化に急しゅんな変化がある雷撃は立ち上がり、立ち下がり時間などの雷撃特性は自然雷と同じである。

3. 発光強度変化波形の周波数スペクトル解析

〈3.1〉 ロケット誘雷の場合 発光強度変化の周波数スペクトルは記録した波形を約 $2.4 \mu\text{s}$ でサンプリングした 512 点 ($=1.25 \text{ ms}$) のデータから FFT によって求めた。発光強度変化 P_{low} のスペクトルと、 P_{high} のスペクトルの比は、放電路を伝送線と見なせば、伝送線の周波数特性を現す。ロケット誘雷による雷撃の場合の代表的な周波数特性 2 例を、図 4 (a), (b) に示す。(a), (b) 図は、それぞれ図 2, 図 3 (b) の発光強度変化波形から求めている。各図の上側は P_{low} と P_{high} の位相差、下側は振幅の比を現している。ここで P_{low} と P_{high} の発光源の放電路上の間隔 (以後、伝搬距離という) は約 250 m である。図 4 (a)

図 4 放電路の代表的な二種類の周波数特性
Fig. 4. Two typical frequency responses of ground stroke channels.

図 5 ロケット誘雷による 2 個の落雷中の 6 個の雷撃の周波数特性

Fig. 5. Frequency responses for 6 return strokes in 2 flashes triggered with rockets.

の雷撃の場合、周波数特性は低域通過フィルタの特性と同じである。80 kHz 付近から位相差の変動が大きくなっており、100 kHz 以上では雑音成分が卓越していると思われる。図 4 (b) の雷撃の場合は全体としては低域通過フィルタの特性に似ているが、10 kHz ~ 20 kHz の間に (a) のように単調に減少していない領域があり、この周波数特性を簡単な伝送線モデルで表現することは難しい。以下において、図 4 (a) のような周波数特性のものをタイプ A, (b) 図のようなものをタイプ B と呼ぶことにする。ロケット誘雷による全雷撃 33 例のうちタイプ A の雷撃が 12 例、タイプ B が 13 例、どちらも判断のつかないものが 8 例あった。

図 5 はタイプ A の特性を持つ雷撃のうち、80 kHz まであまり雑音成分がない 2 個の放電に含まれる 6 個の雷撃の周波数特性を重ね合わせて同じ図に示したものである (図中の曲線については〈4.2〉節で述べる)。どの雷撃もかなりよく似た特性を示している。伝搬距離 250 m で、平均的な周波数特性の減衰量は 4 kHz で約 1 dB, 80 kHz で 6 dB で、位相差は 4 kHz で $-\pi/20$, 80 kHz で $-3\pi/7$ である。

〈3.2〉 自然雷および煙突への雷の場合 自然雷と煙突への雷についても周波数特性を求めたところ、全 23 雷撃のうち図 4 (a) のようなタイプ A の特性のものが 17 例、(b) 図のようなタイプ B のものが 1 例、どちらも判断のつかないものが 5 例あった。この数値から明らかなように、自然雷および煙突への雷による雷撃のほとんどはタイプ A の放電路の周波数特性を持っていることがわかる。タイプ A の特性を示す雷撃で自然雷や煙突への雷の周波数特性の例を図 6 に示す。但し、これらの雷撃については、発光強度測定

図 6 自然雷(a), (b)および煙突への雷撃(c)の周波数特性

Fig. 6. Frequency responses for natural lightning, (a) and (b), and lightning triggered with a chimney (c).

用レコーダのチャンネル間の利得のキャリブレーションがなされていなかったため、図の周波数特性のゲインの値が 0 dB であっても P_{high} と P_{low} のスペクトル強度が等しい訳ではない。図 6 (a), (b) は自然雷によるもので、(a) は夏の負極性落雷、(b) は冬の負極性落雷の例で、伝搬距離が (a) は 850 m、(b) は 370 m である。図 6 (c) は煙突 (高さ 200 m) への雷撃で伝搬距離は 170 m である。伝搬距離の違いにより減衰量が差が見られる。図 6 の例では P_{high} と P_{low} の絶対値が分かっていないため、次の章で示す周波数特性に等価な伝送線モデルにおける線路定数を求めることはできない。しかし、タイプ A の周波数特性を持

つロケット誘雷による雷撃について求めた線路定数は伝搬距離を考慮すれば、図 5 と図 6 の利得や位相差が大きく異なっていないことから、自然雷について求めた線路定数と大きく変わらないと考えられる。また、自然雷の雷撃のほとんどは、タイプ A の周波数特性を持っているのでその線路定数を自然雷にも十分適用できと思われる。

4. 雷放電路の線路定数

〈4.1〉 発光強度と電流の関係 前章で求めた放電路の周波数特性は発光強度から求めたものであり、我々にとって最も関心のある電流に対する周波数特性ではない。しかし、発光強度と電流は互いに独立な事象ではなく、ある関係が存在すると考えられる。その関係が記述できれば前章の発光強度の周波数特性から電流の周波数特性を求めることができる。更に、その電流の周波数特性を伝送線の線路定数で表現できる。Braginskii 氏⁽¹⁶⁾は大気圧中の絶縁破壊において、放電路の進展を流体力学を基に解いて、放電路の温度 T と電流 I のあいだに次の関係式を導いている。

$$T = 4.1 \times 10^4 \cdot \rho_0^{1/14} \cdot t^{-3/14} \cdot I^{2/7} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_0 は定数で $1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 、 T は絶対温度、 t は時間 (μs)、 I は電流 (kA) である。放電路が光学的に厚いと考えれば⁽¹⁷⁾、ボルツマンの法則により発光強度 P は

$$P = \sigma T^4 = \sigma \{4.1 \times 10^4 \rho_0^{1/14}\}^4 \cdot t^{-12/14} \cdot I^{8/7} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 σ はボルツマン定数である。(2)式は P が I の $8/7$ 乗に比例することを示している。

次に実際の雷放電において P と I の関係を見てもうことにする。図 7 はロケット誘雷による雷撃の場合について発光強度と磁界変化のそれぞれのピーク値をプロットしたものである。磁界変化はすべて雷撃点から 1.5 km の地点で測定された。従って、磁界変化は近似的に電流変化に比例していると見なすことができる。図には P が I の 1 乗および 2 乗に比例する場合の直線も同時に示してある。この図より P と I の間には強い相関関係があり、 P は I の 1~2 乗に比例することが分かる。

また、角氏⁽¹⁸⁾は数十 mS 以内に終了する雷撃の地上近傍の発光強度と、大地に流れ込む電流の時間変化波形が大変よく似ていることを指摘している。通常の雷撃は、連続電流成分を除けば継続時間は長くても 1 mS 程度であるから、発光強度と電流は同じように変化しているといえる。

図7 帰還雷撃における発光強度と磁束密度変化の関係

Fig. 7. Peak light intensities vs. peak magnetic flux densities associated with return strokes triggered with rockets.

以上の議論より、発光強度は近似的に電流の1乗ないし2乗に比例すると考えることができる。はっきりした発光強度と電流の関係がわかればそれを使って新たに放電路の線路定数を求め直すことができ、その関係が1乗や2乗であっても同じ様に取り扱えるので、ここでは発光強度は電流の1乗に比例すると仮定する。但し、次節において $P=I^k$ としたときの k をパラメータにとって線路定数を計算している。

(4.2) 線路定数 ここで、雷放電路を伝送線で模擬しよう。伝送線の単位長あたりの抵抗を R 、インダクタンスを L 、静電容量を C 、漏れコンダクタンスを G とすれば、入出力の比すなわち伝送線のシステム関数 $H(\omega)$ は次式で与えられる。

$$H(\omega) = \text{EXP}[-\{(R + j\omega L) \times (G + j\omega C)\}^{1/2} X] \\ = \text{EXP}[-\{RG - \omega LC + j\omega(RC + GL)\}^{1/2} X] \dots\dots(3)$$

ここで、 $j = \sqrt{-1}$ 、 ω は角周波数、 X は伝搬距離である。観測データを用いて(3)式の線路定数を最小二乗法により求めることができる。(3)式をデータにあてはめる際に次の条件を課す；

- (1) 各線路定数はすべて正である。
- (2) $L \times C$ は平均的な雷撃速度 1.0×10^8 m/S⁽¹²⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾ の2乗分の1に等しい。
- (3) C は長さ l 、半径 r の円柱状導体が大地と垂直に、その下端が大地から d の高さにあるときの単位長当たりの静電容量とする。

図8 雷放電路の線路定数の一例

Fig. 8. An example of line constants of a transmission line representing a return stroke channel.

図9 放電路抵抗の指数 K と放電路の半径に対する依存性

Fig. 9. The resistance of a return stroke channel vs. an index number K and the channel radius.

C を次式に示す。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\log\left[\frac{l}{r}\left(\frac{4d+l}{4d+3l}\right)^{1/2}\right]} \dots\dots(4)$$

ここで ϵ_0 は真空中での誘電率である。 l および d は代表的な値として、それぞれ 3 km、50 m とする。

条件(2)は $R=G=0$ のとき成り立つ関係式であるが、 $R \ll \omega L$ 、 $G \ll \omega C$ の場合も同様に成り立つ。 1.0×10^8 m/S という速度は発光強度の立ち上がりの部分から求めており、 ω が非常に大きい場合の値であるから $R \ll \omega L$ 、 $G \ll \omega C$ が満足され、条件(2)が成り立つ。

図4(a)に示された帰還雷撃の周波数特性について求めた線路定数 R, L, C, G の値を放電路の半径を変数として図8に示す。但し、発光強度が電流の1乗に比例するとしたときの値である。 r が 0.1 mm から 10 cm まで変化するとき、各線路定数のオーダーは R が数十 Ω /m、 G が数十 nS/m、 L が数十 μ H/m で、 C は(4)式より数 pF/m である。次に $P=I^k$ としたと

図 10 6 個の雷撃の放電路についての半径と抵抗の関係

Fig. 10. The resistances of six return stroke channels as a function of the channel radius.

図 11 代表的な放電路の半径と線路定数の関係

Fig. 11. Typical line constants of the return stroke channel as a function of the channel radius.

きの指数 k をパラメータとして半径 r に対する抵抗値 R を図 9 に示す。 k を 1.0 から 2.0 まで変えたとき、 k の増加とともに R は減少している。しかし、その変化分は $r=1$ mm で約 30% 程度であり変わらない。 $k=1.0$ として計算した 2 個の放電に含まれる 6 個の雷撃 (図 5 に示した雷撃と同じ) の個々の抵抗値を図 10 に示す。各 r での R のばらつきは最大 20 Ω/m 程度である。自然雷の帰還雷撃の放電路の半径は数 mm のオーダーであると言われている⁽²¹⁾。図 10 で $r=1$ mm の時 R は 19~36 Ω/m の範囲である。この値は Uman 氏⁽²²⁾が光のスペクトル線のデータを基に理論的に求めた平均的な放電路の導電率 180 (Ωcm⁻¹) から計算した抵抗値 18 Ω/m ($r=1$ mm) に良く合っている。

この 6 雷撃の全データ (図 5) に対して、 $P=1^{1.0}$ を仮定して線路定数を求めた。このときの (3) 式の $H(\omega)$ を図 5 に実線で示す。ここで、80 kHz 以上の値は外挿されたものである。このときの線路定数を図 11 に示す。 $r=1$ mm で、 $R=27$ Ω/m、 $G=16$ nS/m、 $L=$

26 μH/m、 $C=3.9$ pF/m である。この値はロケット誘雷による雷撃放電路を伝送線表現したときの伝送線の平均的な線路定数である。この線路定数を使えば線路の特性インピーダンス Z_0 は次式で与えられる。

$$Z_0 = \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{730 + 6.8 \times 10^{-10} \omega^2}{2.6 \times 10^{-16} + 1.5 \times 10^{-23} \omega^2}} * \right.}$$

$$* + \frac{4.3 \times 10^{-7} + 1.0 \times 10^{-16} \omega^2}{2.6 \times 10^{-16} + 1.5 \times 10^{-23} \omega^2} \left. \right\}}$$

$$- j \sqrt{\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{730 + 6.8 \times 10^{-10} \omega^2}{2.6 \times 10^{-16} + 1.5 \times 10^{-23} \omega^2}} * \right.}$$

$$* - \frac{4.3 \times 10^{-7} + 1.0 \times 10^{-16} \omega^2}{2.6 \times 10^{-16} + 1.5 \times 10^{-23} \omega^2} \left. \right\}}$$

..... (5)

これまで雷放電路の特性インピーダンスを実際の雷放電の観測から周波数の関数として求めた例はない。(5) 式により、それがはじめて明確にされた。

5. 結 論

帰還雷撃放電路のある高さだけからの情報を簡単に測定できるのは、発光強度の測定である。我々はこの点に着目し、放電路の発光強度測定より帰還雷撃の伝送線モデルにおける伝送線の周波数特性を明らかにした。その特性には二つのタイプがあり、一つは周波数とともに位相差と減衰量が単調に減衰するタイプ (A) で、もう一つは数十 kHz 付近に滑らかなでない部分があるタイプ (B) である。ロケット誘雷による雷の約半数および自然雷のほとんどはタイプ A の特性を持っている。発光強度が電流の 1 乗に比例すると仮定した場合、周波数特性の減衰量は 4 kHz で約 1 dB、80 kHz で 6 dB、位相差 4 kHz で約 $-\pi/20$ 、80 kHz で $-3\pi/7$ である。更に伝送線の線路定数を求めると、放電路の半径が 1 mm と仮定した場合代表値として、抵抗 R は 27 Ω/m、漏れコンダクタンス G は 16 nS/m、インダクタンス L は 26 μH/m となる (このとき $C=3.9$ pF/m)。

この線路定数は、タイプ A の周波数特性を持つロケット誘雷による帰還雷撃の測定データより求めた。その周波数特性はほとんどの自然雷や他のトリガー雷のものとはほぼ同じであり、また、電磁界変化においても異なる点は見られていない。従って、求められた線路定数はロケット誘雷以外の雷にも十分適用できると考えられる。今後、帰還雷撃による放電路の発光強度の高周波領域 (100 kHz~10 MHz) の測定を行なうこと、自然雷や他のトリガー雷のデータを増やして結果の信頼性を高めることなどが必要である。

終りに、ロケット誘雷実験に参加させていただき、いろいろとご援助していただいた名古屋大学 堀井憲爾、鬼頭幸生両先生を始めとする誘雷実験グループの皆様深く感謝致します。また、有意義なご意見を頂いた当研究所 仲野 貴氏、河崎善一郎氏、観測などにご協力頂いた当研究所の長谷正博氏、中田 滉氏および野久保武史氏（現、石川島播磨重工）に感謝いたします。（昭和 59 年 6 月 29 日受付）

文 献

- (1) 市原：「雷現象研究の現状と問題点」高電圧研究会報告（テーマ雷）（昭 58-7）
- (2) A. S. Dennis & E. T. Pierce: "The Return Stroke of the Lightning Flash to Earth as a Source of VLF Atmospherics", *Radio Science*, **68 D**, 7, 777 (1964)
- (3) G. N. Oetzel: "Computation of the Diameter of a Lightning Return Stroke", *J. Geophys. Res.*, **73**, 6, 1889 (1968)
- (4) M. A. Uman: "Currents in Florida Lightning Return Strokes", *J. Geophys. Res.*, **78**, 18, 3530 (1973)
- (5) G. H. Price & E. T. Pierce: "The Modeling of Channel Current in the Lightning Return Stroke", *Radio Science*, **12**, 3, 381 (1977)
- (6) J. A. Leise & W. L. Taylor: "A Transmission Line Model with General Velocities for Lightning", *J. Geophys. Res.*, **82**, 3, 391 (1977)
- (7) J. Rai: "Current and Velocity of the Return Stroke Lightning", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **40**, 1275 (1978)
- (8) P. F. Little: "Transmission Line Representation of a Lightning Return Stroke", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **11** (1978)
- (9) D. M. LeVine & R. Meneghini: "Electromagnetic Fields Radiated from a Lightning Return Stroke: Application of an Exact Solution to Maxwell's Equation", *J. Geophys. Res.*, **83**, C5, 2377 (1978)
- (10) N. Takagi & T. Takeuti: "Oscillating Bipolar Electric Field Changes due to Close Lightning Return Strokes", *Radio Science*, **18**, 3, 391 (1983)
- (11) T. Takeuti, et al.: "The Anomalous Winter Thunderstorms of The Hokuriku Coast", *J. Geophys. Res.*, **83**, C5, 2385 (1978)
- (12) 仲野, 他: 「帰還雷撃速度の測定」電気学会高電圧研究会資料 HV-82-19, 83 (昭 57)
- (13) 高木, 他: 「帰還雷撃の二重の発光現象」電気学会高電圧研究会資料 HV-83-41, 93 (1983)
- (14) D. J. Malan & B. F. J. Schonland: "Progressive Lightning VII", *Proc. Roy. Soc. London, A*, **191**, 485 (1947)
- (15) M. Nakano, et al.: "Return Strokes of Triggered Lightning (Flashes)", *Res. Letters on Atmos. Elec.*, **3**, 73 (1983)
- (16) S. I. Braginskii: "Theory of the Development of a Spark Channel", *Soviet Physics JETP*, **34**, 6, 1068 (1958)
- (17) Yu. N. Zhivlyuk & S. L. Mandel'shtam: "On the Temperature of Lightning and Force of Thunder", *ibid.*, **13**, 2, 338 (1961)
- (18) 角, 他: 「誘雷実験における雷電流と発光の解析」昭 56 電気関係学会東海支部連大 No. 69
- (19) V. P. Idone, & R. E. Orville: "Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP)", *J. Geophys. Res.*, **87**, 4903 (1982)
- (20) V. P. Idone, et al.: "Correlated Observation of Three Triggered Lightning Flashes", *J. Geophys. Res.*, **89**, D1, 1385 (1984)
- (21) R. H. Golde: "Lightning", Vol. 1, 181 (1977) Academic Press, London
- (22) M. A. Uman: "The Conductivity of Lightning", *J. Atmos. Terr. Phys.*, **26**, 1215 (1964)