ロケット手法を用いた冬季鉄塔誘雷による 送電線雷撃パラメータの検討

正員 箕輪昌幸 (トーエネック)

正員 中村光一 (名古屋工大)

正員 若松勝寿 (沼津高専)

Discussions on Lightning Discharge Parameters on Transmission Line by
Altitude Triggered Lightning in Winter Thunderstorm

Masayuki Minowa, Member(TOENEC Corporation),
Koichi Nakamura, Member(Nagoya Institute of Technology),
Masatoshi Wakamatsu, Member(Numazu College of Technology)

This paper presents the altitude triggered lightning to a test EHV transmission line in winter thunderstorm. The inducing wire was isolated with a nylon line from the ground up to the altitude of 70m to 160m. Thirty one striking events have taken place on the several locations of the transmission line. Current wave forms were measured and the corresponding lightning discharge channels were well reconstructed by an acoustic analyzing method. The characteristics of striking distance vs. peak current, and the histogram of vertical striking angle were investigated and discussed from the view point of lightning striking parameter to a transmission line.

キーワード: 冬季雷, ロケット誘雷, 鉄塔誘雷, 送電線雷撃パラメータ, 音響法

1. まえがき

鉄塔誘雷は、トリガ用ワイヤを数十～数百メートルのナイロン線で置き換え、地上より絶縁することにより、ワイヤに拘束されない自由放電を地上高空間に生起させ、鉄塔あるいは送電線に誘雷させる方式であり、Altitude triggered lightningとも呼ばれる。Larocheらはワイヤを400m長のケブラ線で絶縁し、地上高50mの接地ワイヤへの誘雷に成功している⁽¹⁾。

ナイロン上端より数百メートル直立したロケット・ワイヤの先端から上向きリーダが始まり、次いでワイヤ・ナイロン接点から下向きリーダが進展する、いわゆる Bi-directional leader 現象が現れる⁽²⁾。下向きリーダが地上構造物に近づくと、その先端よりリターンストロークが発生する。鉄塔誘雷時のリターンストロークは、自然雷のように雷雲まで一気に駆け上がる放電とは異なり、はじめは 10^7 m/sオーダの速度で進展するが、上部リーダ先端に達すると急激に減速する性質を持つ。したがって、上部リーダの位置に関係するので、局所帰路放電(Partial return stroke)⁽³⁾または Upward return stroke⁽⁴⁾と呼ばれている。また、河崎らは、鉄塔誘雷におけるUHF波帯測定で、自

然雷時のステップドリーダと同様の孤立パルスおよび帰還雷撃時におけるUHF放射強度のバースト状変化が見られることを報告している⁽⁵⁾。このように鉄塔誘雷放電は程度の差はあれ、下向きリーダから帰路放電へと進展する自然雷と類似した現象を呈している。

本鉄塔誘雷は、ナイロン線長が70m～160mである。この長さの根拠は特にないが、長ギャップ・人工大気中インパルス実験などに比べれば、極めて長大なギャップでの放電実験である。本論文は、この実験を実規模送電線に対し、冬季雷を利用する長大ギャップ放電と位置づけ、送電線への誘雷パラメータを自然雷の送電線への雷撃パラメータと同様な取扱いでまとめたものである。自然雷放電との特徴的な違いは、(1) 限定空間からリーダが始まる、(2) 帰路放電は局所的である、などである。

筆者らは、冬季雷に対するロケット誘雷実験で、1986年から1995年までの間に31回の鉄塔誘雷を得ている。また雷撃電流、音響法による雷放電経路再現^(6, 7, 8)などの同時測定データ数もほぼ統計処理ができる程となった。本論文では、第2章で鉄塔誘雷における雷撃点の一覧と分類、相導体への直撃にみられる雷遮蔽失敗などの割合などについて述べる。第3章では、鉄塔誘雷の電流波形と電界変化か

ら局所帰路放電時の電流、音響法に基づく最終雷撃距離の推定と、それらの関係ならびに雷撃点への侵入角など、送電線誘雷パラメータの検討を行なう。第4章で結果の検討を述べ、第5章で全体をまとめる。

2. 鉄塔誘雷と雷撃点

〈2.1〉 鉄塔誘雷 ロケット誘雷実験場は石川県奥獅子吼山頂、北陸電力試験送電線30号鉄塔付近に設けられた⁽⁹⁾。ロケットは30号鉄塔中心から約20m離れた発射塔からほぼ垂直発射される。試験送電線の長さは約2000m、30号鉄塔の高さは59.4mである。塔頂からは2.6mの高さに誘雷針が突出している。ロケットはナイロン線とワイヤを巻いたボビンを持って上昇し⁽¹⁰⁾、ボビンからははじめナイロン線が、次いでワイヤが引き出される。ナイロン線長は70m、100m、120m、160mの4種類を採用した。これにより4.1節で述べるようにリーダ開始点はナイロン長を半径とする球面とロケットの地上発射点での仰角70～90度の範囲内に限定された。

また、地上約100mの上空で2段目のロケットを発射、切り離すことによって、ワイヤを数百メートル直立させる2段ロケット方式を採用し、鉄塔誘雷を実現した⁽¹¹⁾。この場合、ナイロン線は全く使用せず、ワイヤは大地から完全に切り離されている。

〈2.2〉 誘雷結果 表1は31回の鉄塔誘雷の結果の一覧である。誘雷は、ナイロン長70m、100m、120m、160mで、それぞれ2、8、18、1回である。 I_{max} は観測された電流波形の最大値である。針端コロナ電流はロケット発射直前の地上5m高の針電極からの放電電流で、付近の地上電界に対応する。しかし、試験送電線により静電遮蔽されているので、簡易校正実験を実施し、試験送電線によって針端コロナ電流は1/4程度に低減されていることを確認している。ナイロン長100mでは1回(No. 87-21、中相導体)、120mでは5回(上相導体)の遮蔽失敗が起きている。

表2は雷撃点別の生起割合を示す。データ数の多い100m、120mについて考える。100mでは上相アーム、架空地線への割合が高く、120mでは誘雷針、上相導体、架空地線の順となっている。120mでは100mよりわずか20mの差しかないのに、比較的高所に分布している。また、120mでは上相導体への直撃の割合がなぜか28%と高い。一方、地上への誘雷数は1回のみであった。

3. 送電線雷撃パラメータ

〈3.1〉 第1電流パルス 塔頂誘雷針、アーム先端および架空地線にはログスキーコイル電流測定装置および同軸シャント電流測定装置が設置された。それらのサンプリングタイムは200ns⁽¹²⁾および100ns⁽¹³⁾である。図1(a)は塔頂誘雷針への雷撃電流波形で、(b)図は立ち上がり部分の拡大波形である。第1電流パルスは同図(c)、(d)の電界変化から明らかのように、送電線側からワイヤを経由してロケット先端へと進展する局所帰路放電の電流に相当する。

表1 鉄塔誘雷結果の一覧

Table1. Results of triggered Lightning to transmission line.

番号	ナイロン線長(m)	雷撃点	最大電流 I_{max} (kA)	針端コロナ 電流(μ A)	備考
86-11	70	上相アーム	>+50	+3.0	
86-13		地上	-	-6.0	
87-05	100	誘雷針	+18	+0.7	
87-07		上相アーム	-8.5	-0.5	
87-08		架空地線	-11.0	+1.4	
87-10		発射台	負極性	-2.1	
87-18		上相アーム	+14.0	0.0	
87-21		中相導体	負極性	+5.2	遮蔽失敗
87-22		上相アーム	(-5.5)	-8.0	
88-12		架空地線	-	-1.0	
88-04	120	上相導体	-	-6.0	遮蔽失敗
88-16		架空地線	-	+3.0	
89-04		誘雷針	+25.6	-2.0	
89-05		上相導体	正極性	0	遮蔽失敗
89-07		上相導体	正極性	0	遮蔽失敗
89-09		誘雷針	-18.1	+5.0	
89-10		架空地線	-4.3	+8.0	
93-10		誘雷針	+32	+4.0	
93-12		誘雷針	+54	+2.0	
93-19		誘雷針	+132	-0.2	
94-11		上相導体	-	+1.0	遮蔽失敗
94-16		誘雷針	+55	-1.0	
94-21		誘雷針	+39	-4.0	
94-22		誘雷針	+54	-2.8	
95-01		誘雷針	+102	-3.2	
95-02		誘雷針	+18、+32*	-3.8	
95-03		地上	-	-2.2	
95-13		上相導体	-	+0.3	遮蔽失敗
92-03	160	誘雷針	+38	-1.0	
89-16	二段式	架空地線	(+15)	+5.0	
89-21	二段式	中相アーム	-	-3.5	

*) 2つの放電電流の最大値。また89-16の括弧内の数値は磁鋼片または磁気テープ法による

表2 雷撃点の生起割合

Table2. Statistical ratio of striking location.

ナイロン線長 [m]	雷撃点	割合
70	上相アーム	1/2(50%)
	地上	1/2(50%)
100	上相アーム	3/8(37.5%)
	架空地線	2/8(25.0%)
	中相導体	1/8(12.5%)
	誘雷針	1/8(12.5%)
	地上	1/8(12.5%)
120	誘雷針	10/18(55.6%)
	上相導体	5/18(27.8%)
	架空地線	2/18(11%)
	地上	1/18(5.5%)
160	誘雷針	1/1(100%)
2 段式	架空地線	1/2(50%)
	中相アーム	1/2(50%)

この第1パルスの半値幅は $50\mu\text{s}$ 、ピーク値は $+38\text{kA}$ 、電荷量は 1C である。

この過程では、Bi-directional leader のうち、ナイロン線とワイヤとの接点から始まった下向きの進展リーダを局所帰路放電が迎え撃つ。これは局所的ではあるが、自然雷のリターンストロークの過程と極めて類似している。この間の最終雷撃距離がわかれば、最終雷撃距離と第1電流パルスとの関係は、自然雷における最終雷撃距離と雷電流最大値との関係を補間するものと考えられる。この第1電流パルスの値を表3の第1電流パルスの欄に示す。第1電流パルスは大きなもので 50kA を越えるものもあった。またNo. 87-07, No. 87-18, No. 89-04, No. 92-03のように第1電流パルスが最大電流となる場合もあった。

図1 塔頂誘雷針電流と電界変化

Fig. 1. Lightning current through the top of tower and electric field change.

表3 送電線雷撃パラメータ

Table 3. Striking parameters to transmission line.

番号	最大電流 I_{max} [kA]	第1電流パルス I_p [kA]	雷撃距離 D [m]	最終雷撃侵入角 [度]	雷撃点
86-11	>+50	-	13	65	上相アーム
87-05	+18	+10	7	0	誘雷針
87-07	-8.5	-8.5	6	81	上相アーム
87-08	-11.0	-6	18	90	架空地線
87-18	+14.0	+14	9	43	上相アーム
87-21	-	-	7	40	中相導体
87-22	(-5.5)	-	7	76	上相アーム
88-04	-	-	11	44	上相導体
89-04	+25.6	+25.6	8	66	誘雷針
94-16	+55	+35.5	22	35	誘雷針
94-21	+39	+26.0	22	27	誘雷針
94-22	+54	+52.7	40	44	誘雷針
95-13	-	-	24	48	上相導体
92-03	+38	+38	11	24	誘雷針
89-16	(+15)	-	11	46	架空地線
89-21	-	-	7	47	中相アーム

〈3.2〉 最終雷撃距離 奥獅子吼山での誘雷実験は通常視界が悪く、放電経路の鮮明画像はほとんど期待できない。雷鳴の記録から放電経路を再現する音響法は視界の影響が全くない。音響法は、雷放電経路を雷放電が同時に発する線音源とみなし、数値解析で音響信号の適当な時間窓をとることにより、点音源の集合として3次元空間に再現するものである。標定精度は光学観測や現地調査との比較から、マイクから200m程度までの空間で4%以内である⁽¹⁴⁾。

再現の数例を図2, 3, 4に示す。図2 (No. 87-18) はb点からジグザグ模様にa点に達し、上相アームに誘雷している。図3 (No. 92-03)では塔頂誘雷針に誘雷している。b点はナイロン線とワイヤの接合点とみられ、下向きリーダの開始点である。地上高約160mである。bの途中からaまではほぼ直線的な放電経路がみられる。また、a点で屈曲し、塔頂へほぼ垂直に放電している。ここでは最終雷撃距離を塔頂誘雷針からa点までの距離と定めた。図4 (No. 94-21)はやはり塔頂誘雷針の例で、リーダ開始点bは水平に100mシフトしている。塔頂とa点の距離が最終雷撃距離である。a点と雷撃点までの三次元距離を最終雷撃距離とし、表3の最終雷撃距離の欄に並記する。最終雷撃距離は短いもので6m、長いもので40m、単純平均すると14mであった。

〈3.3〉 雷撃侵入角 雷撃侵入角は水平な大地に対し、垂直に侵入する角度をゼロと定義して、音響法による雷放電再現経路から求めた。ここでは最終雷撃の角度を最終雷撃侵入角としている。それらを表3に示す。塔頂誘雷針では、侵入角は主に0~40度に分布し、一方それ以外の、上・中相アーム、架空地線、相導体では45~90度に分布している。

図2 雷放電経路の再現 (No. 87-18)

Fig. 2. Lightning discharge channel reconstructed.

図3 雷放電経路の再現 (No. 92-03)

Fig. 3. Lightning discharge channel reconstructed.

図4 雷放電経路の再現 (No. 94-21)

Fig. 4. Lightning discharge channel reconstructed.

〈3.4〉 雷撃距離と電流との関係 最終雷撃距離 D と雷電流最大値 I の関係式として、下の4式が提案されている^(15, 16)。

$$D = 7.1 I^{0.76} \quad (1)$$

$$D = 6.7 I^{0.8} \quad (2)$$

$$D = 10.6 I^{0.51} \quad (3)$$

$$D = 3.3 I^{0.78} \quad (4)$$

(1)~(4)式は、それぞれBrown & Whitehead, Armstrong & Whitehead, Wagner, Golde & Chanの式として知られている。上の4式の関係を図5に示す。また、表3の雷撃距離と第1電流パルス I_p の関係を図5中9個の点に示す。それらは(5)式で与える特性(a)の近くに分布している。

$$D = 0.62 I_p^{1.04} \quad (5)$$

同一電流値に対する最終雷撃距離は(1)~(4)式の1/2以下となっている。

図5 雷撃距離対第1電流パルス

Fig. 5. Striking distance vs. first current pulse.

4. 検討

〈4.1〉 リード開始点 鉄塔誘雷ではナイロン線長がわかっているため、音響法の放電路再現からワイヤとの接合点、すなわち下向きリードの開始点座標は容易に推定できる。図6は送電線方向からみた座標点(x-z平面)を示す。ロケット発射塔は鉄塔中央 ($x = 0$ m) からほぼ22m離れている。大半は発射塔直上方向にあり、また鉄塔塔頂中央から、その垂直軸より70度の範囲内にすべて収まっている。No. 94-21は100mも離れているにもかかわらず、塔頂へ誘雷している。

〈4.2〉 侵入角の検討 侵入角を θ とすると、その累積頻度分布は $\cos^n \theta$ に比例すると言われる。日本では $n = 3$ とされる。表3の雷撃侵入角の頻度を10度ごとにまとめると図7である。 θ が40~50度での頻度が最も大きくなっており、 $\cos^3 \theta$ の場合とは異なる分布となっている。

図6 リーダ開始点 (x-z平面)

Fig. 6. Start points of leader (x-z plane).

図7 侵入角のヒストグラム

Fig. 7. Histogram of vertical striking angle.

5. むすび

冬季雷雲下、送電線上空数十メートルの限定空間にリーダ開始条件を人工的に作るにより、得られた誘雷はこれまでに31回を数えた。送電線への長大ギャップ放電としてその結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 31回の送電線誘雷のうち、大半は鉄塔、架空地線へ誘雷したが、相導体への直撃、すなわち遮蔽失敗は6回を数えた。この生起頻度は実際と比較して高い数値であると思われるが、リーダの空間的条件がそろえばこのような頻度で発生すると考えられる。

(2) 第1電流パルスが局部帰路放電電流に対応し、この電流が放電全体の最大値を示したことも数例あった。

(3) 最終雷撃距離は6~40mで、その平均は14mであった。

(4) 最終雷撃距離と第1電流パルスの関係は提案式と比較すると、電流に対する雷撃距離が小さい傾向にあった。

(5) 侵入角 θ の累積頻度分布は $\cos^3 \theta$ に比例する特性

とはならなかった。

本実験は地上70~160mの限られた空間からの誘雷結果を述べた、本研究が冬季雷に対する送電線の雷遮蔽研究の一助になれば幸いである。今後はナイロン線長をさらに長く延ばしたケースでの誘雷を目指したい。

最後に、本研究をまとめるにあたり、大同工業大学長堀井憲爾先生、中部大学 角 紳一助教授、豊田工業高等専門学校 仲野 賛教授並びにロケット誘雷グループの諸先生方、さらには実験に参加された学生諸君に感謝いたします。また実験遂行に助力いただいた北陸電力、中部電力の関係各位に謝意を表します。なお、本研究は文部省科学研究の助成(電力線を覆う空間電荷の雷遮蔽効果の人工誘雷方式による検証)を受けていることを付記する。

(平成8年7月25日受付、同年9月24日再受付)

文 献

- (1) P. Laroche, et al., "Observations of bi-directional leader development in triggered lightning flash", Proc. of 1991 int. Aerospace and Ground Conf. of Lightning and Static Electricity, pp. 57-1-57-10, Cocoa Beach, Florida, 1991
- (2) 例えば, X-M, Shao, et al., "The spatial and Temporal Development of Intracloud lightning", Proc. of 10th International Conference on Atmospheric electricity, pp. 321-324, 1996
- (3) K. Nakamura, et al., "Artificially Triggered Lightning Experiments to an EHV Transmission Line", IEEE Trans. on PD, Vol. 6, No. 3, July 1991
- (4) M. A. Uman et al., "1995 Triggered Lightning Experiment in Florida", Proc. of 10 International Conference on Atmospheric electricity, pp. 644-647, 1996
- (5) Z. Kawasaki, et al., "Common Physical Processes in Natural and Triggered Lightning in Winter Storm in Japan", J. Geophys. Res., vol. 97, No. D12, pp. 12, 935-12, 945, August 20, 1992
- (6) 若松, 他: 「雷鳴解析による雷放電路の再現」, 電学論B, 108巻6号, pp. 277-287, 1988
- (7) 若松, 他: 「ロケット誘雷による近距離雷鳴と雷放電路の再現」, 電学論B, 109巻6号, pp. 281-287, 1989
- (8) 中村, 他: 「音響法による雷放電路再現のDSP並列処理によるリアルタイム化」, 電学論B, 112巻12号, pp. 1069-1076, 1992
- (9) 堀井, 他: 「ロケットによる電力線路および保護装置への雷撃試験」, 昭和62年度科学研究補助金(試験研究)研究成果報告書, 課題番号60850052, 1985
- (10) 堀井, 他: 「送電鉄塔へのロケット誘雷実験」, 電学論B, 107巻9号, p. 359, 1987
- (11) 和田, 他: 「2段式ロケットを用いた送電線鉄塔へ

- の誘雷技術」, 電学論B, 112巻4号, pp. 355-356, 1992
- (12)葛城, 他:「雷サージメモリー開発と鉄塔・架空地線雷電流観測結果」, 電学論B, 111巻1号, pp. 31-37, 1991
- (13)若井, 他:「実雷撃による奥獅子吼試験送電線サージ特性観測結果」, 電学論B, 114巻5号, pp. 545-546, 1994
- (14)若松, 他:「冬季近距離雷鳴による雷放電路の再現精度」, Res. Lett. Atmos. Electr., No. 10, pp. 81-88, 1990
- (15)H.R.Armstrong, et al., "Field and Analytical Studies Transmission Line Shielding", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-88, pp. 270-281, 1968
- (16)G.W.Brown, et al., "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding, Part II", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-87, pp. 617-626, 1969

箕輪 昌幸 (正員) 1963年6月21日生まれ。94年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程満了。同年4月(株)トーエネックに入社。現在に到る。主として雷害防止技術に関する研究に従事。電気設備学会会員

中村 光一 (成員) 1942年3月7日生まれ。65年名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。66年同電気工学科助手。88年助教授。現在に至る。工学博士。電力系統解析, 高温超伝導電力応用, ロケット誘雷などの研究に従事。82年電気学会論文賞, 90年電気学会進歩賞受賞。電気設備学会, 日本大気電気学会, 低温協会, IEEE会員

若松 勝寿 (成員) 1942年4月17日生まれ。68年名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。70年1月沼津工業高等専門学校講師, 83年4月同助教授, 89年4月同教授, 現在に至る。工学博士。主に雷鳴と雷放電路に関する研究に従事。日本音響学会, 日本大気電気学会会員。