新しい雷放電進展モデルの検討

正 員 相 原 良 典 (電中研)

A Study of a New Lightning Progression Model

Yoshinori Aihara, Member (CRIEPI)

Lightning is one of the most important reasons for proper insulation design of power transmission apparatus. It has been known that lightning progression features in winter and summer seasons differ in the occurrence process and a scale and so on. There are unknown lightning parameters though a lot of records of lightning observation were obtained up to this time.

This report deals with a new lightning progression model and the estimation methods of the various parameters of the lightning phenomena quantitatively based on the data of long gap tests and lightning observations. The new progression model is applicable to not only winter lightning but also summer lightning, and the values of various parameters such as the charge density of a stepped leader, the leader development velocity, the time interval between steps, the time-to-discharge of first stroke, the final striking distance and so on are estimated by a new calculation method. The new model is useful for a computer simulation of lightning progression and development of a new lightning shielding theory.

キーワード：雷，雷放電シミュレーション，雷放電パラメータ，雷遮へい，冬季雷，雷撃距離

1. ま え が き

古くから，雷は送電線設備にとって大敵であり，夏季雷を中心に雷研究が進められてきた。一方，近年，日本海沿岸を通過する基幹送電線が増加するに伴い，冬季雷による二回線におよぶ多相地絡事故が多発していることから，その雷撃様相の解明や冬季雷に対する新しい雷遮へい理論の構築が望まれている。夏季雷と冬季雷は現在まで得られた多くの雷観測によって，雷雲の発生過程，規模，雷放電進展機構などが異なることが解明されている。しかし，自然雷現象を対象とする雷観測のみでは雷撃様相を十分把握することは困難であり，未解明な部分も多い。また，雷観測データには大きなばらつきがあり，雷放電パラメータを定性的，定量的に解析することは，今後の雷事故防止予測上重要な課題ともいえる。

著者らは，冬季雷に対する新しい雷遮へい理論の構築のため，雷観測ならびに模擬実験データを基に，雷遮へい特性，雷放電進展シミュレーションの検討を進

めている。雷放電進展過程は夏季雷，冬季雷ともにステップ状リーダが徐々に長く伸び，主放電(第一雷撃)に至ることが知られているが，放電方向，ステップ数，放電路の長さなどが異なり，送電線の雷事故に及ぼす影響もまた異なると考えられる。

雷放電モデルはこれまでも Deller らを初めに，多数提案されている^{(1)~(4)}。これらのモデルは夏季雷の下向き放電を対象とし，主として最終ステップ過程を模擬したものである。しかしながら，冬季雷に特徴的な上向き雷放電に対するモデルを考える場合，大地構造物から発生するリーダが雷雲に到達するまでの全過程を模擬する必要がある，それらのモデルでは現象的な説明が不十分である。更には，それらのモデルの基礎データに対しても，電圧の種類や電極配置などの違いのため，冬季雷放電モデルにはそのまま適用できないものと考えられる。

本論文は，雷インパルス電圧による長ギャップ放電実験から得られた諸パラメータを雷放電領域に延長し，同時に，大きな放電機構の差違を一定の仮定を置

くことにより、各種雷放電パラメータを定量的に取扱うことのできる雷放電進展モデルについて検討した結果を取りまとめたものである。この結果は、計算機シミュレーションの開発、そして冬季雷や夏季雷に対する新しい雷遮へい理論の構築に役立つであろう。

2. モデル実験結果

図1に冬季雷の上向き放電を模擬した実験回路を示す。金網電極 ($6 \times 6 \text{ m}^2$) に負極性雷インパルス電圧を印加し、下部の丸棒電極側から上向きリーダを発生させた。放電ギャップと並列に $1 \text{ m}\phi$ の半球状さい断ギャップを設置し、さい断時間を制御することにより、リーダを進展途中で停止させ、リーダ長と電流波高値との関係を調べた。リーダ長は放電ギャップの横方向に設置した静止カメラで観測した。

今回提案した雷放電モデルの特徴は、実験によって進展途中でさい断されたリーダを、雷放電でみられる

図1 実験回路
Fig. 1. Test circuit.

図2 さい断されたリーダ観測例
Fig. 2. Photographs of chopped leader.

個々のステップトリーダと対応づける新しいアプローチを行い、リーダ進展の全過程を模擬したことにある。

試験電圧波形は $-1/40 \mu\text{s}$ 波ならびに $-1.5/2,100 \mu\text{s}$ 波の2種類を用いたが、結果として両者による特性に大きな差違は生じなかった。

図2にギャップの長さ (L) が 1 m のときのリーダ長 (l) の静止写真例を示す。リーダ長が長いほど電流波高値が大きく、リーダが一本 (上段) のときよりも枝分かたれの場合 (下段) のほうが電流が大きいく。

印加電圧をギャップ間の50%フラッシュオーバー電圧のおよそ1.05~1.20倍とした場合のデータであるが、電圧が大きいくと枝分かたれリーダが多く発生した。同一リーダ長でもこのときのリーダ電流は単一リーダの場合よりも大きい。冬季雷放電ではこのような枝分かたれ現象が多く観測されている⁽⁸⁾が、一本の放電路に対するリーダ電流などの特性値を調べるため、以下に示す実験式は図2の上段に示すような単一リーダ発生時に対する特性をとりまとめた。

以下に、モデル実験で得られた実験式を示す。リーダ長 l はまず次式で与えられる。

$$l = 2L \{1 - \exp(-0.013 I_L^{0.7} / \sqrt{L})\} \leq L(m) \quad (1)$$

フラッシュオーバー時 ($l = L$) における電流 I_L は(1)式を基に次式が得られる。

$$I_L = 295 L^{0.71} (A) \quad (2)$$

一方、電流波形の観測から、さい断までの時間積分により、リーダ中電荷量 $Q_l(C)$ を求め、次式の関係を得た。

$$Q_l = 0.8 \sqrt{L} I_L \times 10^{-6} (C) \quad (3)$$

$$Q_l = 400 L^{1.21} \left\{ -\ln \left(1 - \frac{l}{2L} \right) \right\}^{1.43} \times 10^{-6} (C) \quad (4)$$

フラッシュオーバー時には次式が成立する。

$$Q_L = 235 L^{1.21} \times 10^{-6} (C) \quad (5)$$

リーダ中電荷密度 q_l ならびに q_L は(4)、(5)式を基に、次式で与えられる。

$$q_l = Q_l / l (C/m) \quad (6)$$

$$q_L = Q_L / L = 235 L^{0.21} \times 10^{-6} (C/m) \quad (7)$$

q_l または q_L の値はギャップの長さが 5 m 以下の長ギャップでは、およそ $50 \sim 300 \mu\text{C/m}$ となった。

リーダ進展速度 V_l ならびに V_L は、(1)式ならびに(3)式を微分することによって次式を導いた。

$$V_l = -1.77 \sqrt{L} \left(1 - \frac{l}{2L} \right) \ln \left(1 - \frac{l}{2L} \right) \times 10^{-6} (m/s) \quad (8)$$

$$V_L = 0.613\sqrt{L} \times 10^{-6} \text{ (m/s)} \dots\dots\dots (9)$$

連続進展するリーダの進展時間 t_L ならびに t_L についてもまた、(1)～(3)式を基に次式を導いた。

$$t_L = 0.8\sqrt{L} \left[8.5 + \ln \left\{ \left(-\sqrt{L} \ln \left(1 - \frac{L}{2L} \right) \right) \right\}^{1.43} \right] \times 10^{-6} \text{ (s)} \dots\dots\dots (10)$$

$$t_L = 0.8\sqrt{L} (8 + 0.71 \ln L) \times 10^{-6} \text{ (s)} \dots\dots\dots (11)$$

3. 雷放電への適用

(3・1) 雷放電パラメータの推定 モデル実験結果を基に、自然雷放電領域における諸パラメータを推定すると図3～図6の特性が得られる。

放電路の長さ L は夏季雷⁽⁵⁾に対して1～14 km、冬季雷に対して0.2～1.5 kmと考え、図4に雷撃電流

図3 雷撃電流，リーダ中電荷量の計算値
Fig. 3. Calculated values of lightning discharge current and charge of leader.

図4 リーダ中電荷密度の計算値
Fig. 4. Calculated value of charge density of leader.

I_L ならびにリーダ中電荷量 Q_L ，図5にリーダ中電荷密度 q_L ならびに q_L の計算値を示した。冬季雷⁽⁶⁾に対する I_L の計算値は夏季雷の値 (40～260 kA) より小さくなるが、自然雷では枝分かれ放電が生じるため、上向き放電が現れる冬季雷に対しては、大地側で観測される電流値は上記計算値の2～4倍になることがあると考えられる。

図5にリーダ進展速度の計算値を示す。リーダ進展中の速度 V_L はおよそ 10^6 m/s 以上であり、雷観測でみられるステップトリーダの平均進展速度 (10^5 m/s オーダ) よりも一けた以上速いものとなっている。この差違は図5が1本のリーダの進展速度を表しており、ステップトリーダ全体の先端の速度とは異なるためである。主放電時における最終速度 V_L の計算値は、夏季雷に対するリターンストローク速度の観測値 ($2 \sim 24 \times 10^7$ m/s) とオーダ的に一致した。

図6にリーダ進展時間とリーダ中電荷量の関係を示す。リーダ長が長くなるとリーダ速度は急激に速くなり、一定の放電路の長さ L に対するリーダ進展時間はリーダ中電荷量やリーダ長の増加に比べてその伸び率は小さい。このことは、雷放電の各ステップトリー

図5 リーダ速度の計算値
Fig. 5. Calculated value of leader development velocity.

図6 リーダ進展時間とリーダ中電荷量の関係
Fig. 6. Relation between development time and charge of stepped leader.

図 7 ALVS による雷放電進展過程観測例
Fig. 7. Example of lightning observation result using ALVS.

ダの進展時間を考えた場合、ステップ間隔がほぼ一定となる性状と比べて非常に興味ある現象である。

〈3・2〉 雷放電進展モデル 従来、雷放電進展様相は回転カメラや 8 mm カメラを改造したストリークカメラによって時間分解されたリーダが観測されてきた。しかし、これらは解像度が不十分であり、個々のステップリーダの進展様相が詳しく解明されなかった。

図 7 は当所において開発された ALVS (雷放電進展様相自動観測装置) によって捕えられた自然雷のリーダ進展過程観測例である⁽⁷⁾。

上記の観測例では四つのステップリーダの進展後に主放電が生じている。通常、各ステップリーダの進展中にみられるリーダは発光強度が弱く、回転カメラなどでは観測されなかったものであり、リーダ進展の休止時間とみられているものである。

新しい雷放電進展モデルは次のように取扱った。

(i) 各ステップリーダの進展過程を、前述の長ギャップ放電実験により得られた連続進展リーダの特性と対比させた。

(ii) いったん停止したステップリーダは、すぐに 0 から再進展するものとみなす。従って、雷撃までの放電時間 (t_s) は各ステップリーダの進展時間の和で与える。

(iii) 各ステップリーダの停止条件として、放電路の長さ L で定まるリーダ中電荷量 Q_L を与え、適当なステップ数 N (下表参照) を仮定することにより、各ステップリーダには $Q_L/N \times i (i=1 \sim N)$ だけ注入され、これに対応するリーダ長まで伸びるものとする ((4) 式参照)。

ただし、リーダの最終雷撃条件は後述するように別の考え方に基づいて決定する。

このモデルによって、従来考慮されていなかった放電時間、リーダ先端の進展速度 (V_s) についてもま

表 1 雷放電のステップ数の予測
Table 1. Evaluated number of stepped leader.

	放電路の長さ L (m)	ステップ数 N	放電時間 t_s (ms)
夏季 雷	1,000	20	6.0
		100	30.0
冬 季 雷	14,000	20	26.1
		100	130
冬 季 雷	200	5	0.6
		30	3.7
冬 季 雷	1,500	5	1.9
		30	11.3

た推定可能となる。

〈3・3〉 ステップ数の推定方法 今回提案の雷放電モデルでは、ステップ数 N を与えることによりステップ長が変化する。このステップ数は雷雲内の電荷量やその密度分布などによって影響されると考えられるが、リーダの開始条件との関係が不明であるので、これらの値から推定することは難しい。そこで夏季雷に対する雷観測による放電時間 ($3 \sim 100 \times 10^3$ s)⁽⁸⁾、放電路の長さ ($1 \sim 14$ km) の値を参考に、本モデルを用いてステップ数 N を予測してみた。

夏季雷に対して $N=20 \sim 100$ 、冬季雷に対して $N=5 \sim 30$ の範囲とすると、冬季雷 ($L: 200 \sim 1,500$ m) も含めた放電時間の計算値は表 1 のとおりとなった。夏季雷に対しては観測値とよく一致している結果が得られる。冬季雷に対しては放電時間の観測幅が十分把握されていないため、直接の比較ができないが、適当なステップ長 (表 2 参照) を与えるステップ数である。この場合、放電時間は夏季雷に比べて一けた程度短い値となる。これらの予想ステップ数は回転カメラなどで観測されている値と矛盾しないものと考えられる。

〈3・4〉 最終雷撃過程と雷撃距離 これまで述べた雷放電進展過程は最終ジャンプ直前までの、いわゆる先駆放電に対するものであり、その最終過程においてはリーダが吸引されて最終ジャンプに至る。

図 8 に下向き雷放電に対する最終雷撃過程の説明図を示す。リーダコア (直径数 cm 程度) の周辺領域は直径数 m ～ 数十 m にわたり電離されており、コロナシース (半径 r) と呼ばれている。図中の実線で示された先端までリーダが伸びてきた場合、次のステップ長は Q_L/N の電荷量の増分に伴って進展するであろう。このとき、コロナシースの先端と大地までの残りのギャップ空間 (S_{min}) が雷放電で現れるステップ長の最小値以下ならば、更にその次のステップを踏むこ

図 8 雷撃距離(r_s)の定義
Fig. 8. Definition of lightning distance.

図 9 S_{min} と Δl_{max} の値
Fig. 9. Values of S_{min} and Δl_{max} .

となくそのまま最終雷撃に至るものとする。この場合、雷撃距離 r_s は次のように定義することができる。

$$r_s = \Delta l + r + S_{min} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Δl は最小値が 0 であり、その最大値 (Δl_{max}) は放電路の長さ L とステップ数 N によって定まる値であり前述のモデルによって推定することができる。 S_{min} についてもまた同様に L と N によって定まる値の最小値をとればよい。図 9 に S_{min} ならびに最終ジャンプ直前のステップ長の最大値 Δl_{max} の予想値を示す。

一方、コロナシース半径 r は雷撃時のリーダ中電荷密度 q_L に比例するものと考え、雷撃電流 I_L (kA) の関数として、次式を導いた。

$$r = 7.7 q_L \times 10^3 = 2.55 I_L^{0.3} \text{ (m)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

放電路の長さが 200 m ~ 14 km の範囲では、コロナシースの直径 ($2r$) はおよそ 11 ~ 27 m の値となるものであり、従来から考えられている値と矛盾しない。図 10 は雷撃距離 r_s の計算値を示す。図中の代表値は図 9 においてステップ長の代表曲線が $L = 3$ km のとき $\Delta l = 50$ m を通るものとみなした特性を基に求めたものであり、次式で近似できる。

図 10 下向き雷に対する対地雷撃距離の計算値
Fig. 10. Striking distance for lightning-stroke to the ground.

表 2 諸パラメータの計算値と観測値の比較
Table 2. Comparison of calculated values and parameters obtained lightning observation.

項 目	夏 季 雷		冬 季 雷	
	観 測 値	計 算 値	観 測 値	計 算 値
放 電 路 の 長 さ	1 ~ (5) ~ 14 km		(200 ~ 1500 m)	
リーダ中電荷量	3 ~ 20 クーロン	1 ~ 22 クーロン	0.1 クーロン以上	0.1 ~ 1.6 クーロン
リーダ中電荷密度	200 ~ 1000 $\mu\text{C}/\text{m}$	250 ~ 1600 $\mu\text{C}/\text{m}$	—	250 ~ 1100 $\mu\text{C}/\text{m}$
リーダ電流	(数 ~ 数 100 kA)	40 ~ 260 kA	(2 ~ 110 kA)	12 ~ 53 kA
ステップリーダ平均速度	$\sim (1.5 \times 10^4 \text{ m/s})$	$0.3 \sim 5.4 \times 10^4 \text{ m/s}$	$1 \sim 5 \times 10^4 \text{ m/s}$	$0.5 \sim 8 \times 10^4 \text{ m/s}$
放電時間(第 1 雷撃)	$3 \sim 100 \times 10^{-6}$ 秒	$6 \sim 130 \times 10^{-6}$ 秒	—	$0.6 \sim 11 \times 10^{-6}$ 秒
リーダ最終速度	—	$2 \sim 8 \times 10^4 \text{ m/s}$	($1 \times 10^4 \text{ m/s}$ 以上)	$0.8 \sim 2.4 \times 10^4 \text{ m/s}$
ス テ ッ プ 数	—	(20 ~ 100)	—	(5 ~ 30)
ス テ ッ プ 長	3 ~ 200 m	5 ~ 330 m	(3 ~ 120 m)	14 ~ 300 m
ステップ休止時間	$\sim (50 \mu\text{s})$	260 ~ 1200 μs	(30 ~ 300 μs)	70 ~ 300 μs
最終雷撃距離	(10 ~ 500 m)	15 ~ 420 m	—	8 ~ 120 m

$$r_s = 2.3 I_L^{0.79} \text{ (m)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

図 10 に示される雷撃距離の最大値と最小値の幅は、現在まで提案されている多くの式および観測値を包含するものである⁽⁸⁾。

〈3・5〉 雷放電パラメータの計算値 本論文で示した雷放電進展モデルによって計算される各種パラメータをとりまとめると表 2 のようになる。観測値⁽⁵⁾⁽⁶⁾と比較してよく一致しており、観測データのないパラメータについても推定が可能と考えられる。リーダ中電荷量、電流の観測値は第一雷撃後の連続分を含むものである。

図 11 計算機による雷放電シミュレーション例
Fig. 11. Example of computer simulation
by means of the lighting progression model.

4. 本モデルの計算機シミュレーションへの適用

著者らは現在、上記雷放電進展モデルを用い、冬季雷に対する計算機による雷放電進展シミュレーションの開発を進めている。図 11 に放電路のばらつきを考慮した計算機出力の一例を示す。

5. あとがき

今回提案した雷放電進展モデルの主な特徴は次のとおりである。

- (1) 連続的に進展する長ギャップ放電の単一リーダの特性を、雷放電の各ステップリーダの特性に対応づけた。
- (2) 個々のステップリーダの電荷密度 (単位長あたりの電荷量)、電流、進展速度をリーダの伸展長や放電路の長さによって定量化できた。
- (3) 雷放電進展中のステップリーダ休止時間をリーダ進展時間とみなすことにより、ステップリーダ先端の進展速度を推定した。

(4) 冬季雷は上向き、夏季雷は下向きの放電を対象としたが、その進展過程は同じ取扱いができ、また諸パラメータの量的評価は放電方向、ステップ数、リーダの枝分かれ現象などを考慮することにより同じ計算手法を用いることができると考えられる。

本論文では本モデルを用いて計算機シミュレーションへの適用例を示したが、今後更にプログラムの改良を図り、雷放電進展過程を考慮した新しい雷遮へい理論の構築を目指したいと考えている。

最後に、本論文をとりまとめるにあたり、当所送配電部 鈴木俊男部長、絶縁研究室 新藤孝敏氏、三木恵氏、ほか関係者各位には多大な御支援、御指導を賜りました。厚く感謝の意を表します。

(平成 2 年 5 月 25 日受付、同 2 年 10 月 4 日再受付)

文 献

- (1) L. Deller, E. Garbagnati: IEEE PES, 89 SM 605-7 PWRD (1989)
- (2) A. J. Eriksson: CIGRE 33-80(WG01) 17 IWD(1980)
- (3) T. Suzuki, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst., PAS-100, No. 7, p. 3553(1981)
- (4) F. A. M. Rizk: IEEE PES, 90 WM 084-4 PWRD(1989)
- (5) 放電ハンドブック, 電気学会
- (6) 三宅・三谷・井上・横山: 「独立高構造物への冬季雷の特性」, 電中研研報, T 87040(昭 63)
- (7) 三宅・横山: 「雷放電進展様相観測装置の開発とリーダ進展速度の測定」, 電学論 B, 109 81 (平元-2)
- (8) 電中研レビュー: 「電力施設の雷害防止のために」, 電力中研, No. 19(平元)

相 原 良 典 (正員)

昭 20 年 6 月 26 日生。44 年 3 月 東京電機大学二部電気工学科卒業。39 年 4 月 (財)電力中央研究所入所。主として、大気中放電現象、雷遮へいに関する研究に従事。50 年 オーム技術賞受賞。