

# 対地雷撃電流波形の検討

Waveform of Lightning Return Stroke Current

石 井 勝\*・北 條 準 一\*・河 村 達 雄\*

Masaru ISHII, Junichi HOJO and Tatsuo KAWAMURA

## 1. はじめに

架空送電線の事故率は送電電圧の上昇と共に減少しているが、その中で自然雷による事故の占める割合は増大してゆく。わが国における現在の最高送電電圧である交流 500 kV の送電線では、事故原因のほとんどすべてが自然雷であり、次期送電電圧として選定された交流 1100 kV の送電線では、事故原因として自然雷のみが想定されている。

架空送電線が直撃雷を受けた際に事故に至るか否かは雷撃電流の波形に依存する。簡易な測定手段による波高値のデータはかなり収集されているが、オシロスコープ等による信頼性の高い雷撃電流波形のデータは、わが国ではほとんど得られていない。このため、耐雷設計に当たっては、海外の雷撃電流波形に関するデータを参考にせざるを得ない状況である。一方、雷電流が流れるのに伴って誘導あるいは放射される電界、磁界は電流波形の情報を含んでおり、電磁界変化波形が高精度で測定され、かつその誘導、放射、伝搬機構が明らかになれば、波源の電流波形を復元することが原理的には可能となる。この点に着目した研究も以前から行われており、わが国でもその先駆的な試みが行われたが、その後長くこの研究はわが国では中断していた。この間、測定技術の進歩によって、電磁界変化波形の高精度の測定が可能となり、また最近になって、その誘導、放射機構に関する研究が急速な進展を見ている。このため、電磁界変化波形の測定を通じての雷電流波形の研究は、工学的にも有力な手法として復活させる価値があると考えられる。

本報では対地雷撃電流波形と現行の耐雷設計手法の関係、および対地雷撃に伴う電磁界変化波形の最近の実測結果と、海外での電流波形の測定データにもとづいて、耐雷設計の際に考慮すべき標準的な雷電流波形について検討した結果を述べる。

## 2. 雷撃電流の鉄塔電位上昇値への影響

架空送電線が直撃雷を受けて事故に至る機構として

は、しゃへい失敗と逆フラッシュオーバーの 2 種類が考えられているが、多相事故や変電所への侵入雷サージの要因として重視されるのは後者である。これは接地された鉄塔や架空地線に落雷した際に、接地側の電位が鉄塔と導体の間の絶縁耐力を上回って上昇することによって事故に至ると考えられている機構である。

逆フラッシュオーバーによる事故率や、変電所への侵入雷サージ波形を計算するには、雷撃電流波形を想定し、さらにその直撃によって生じる送電線鉄塔の電位上昇波形を推定する必要がある。わが国で現在、標準的な雷撃電流波形として想定されているのは、立ち上がり時間  $t_r = 2$  または  $4 \mu s$  の図 1 に示すような 2 種類の波形である。

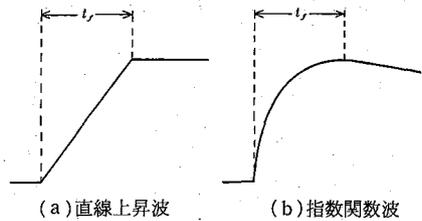


図 1 対地雷撃電流の想定波形

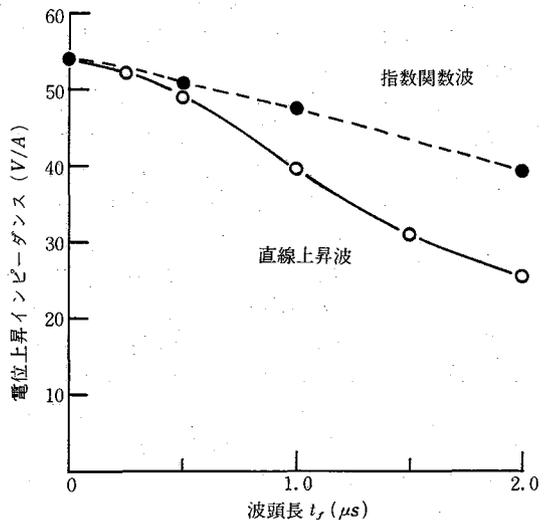


図 2 500 kV 2 回線鉄塔上相アーム—도체間の電位上昇波高値 (架空地線 2 条, 接地抵抗 21  $\Omega$ , 塔高 78 m)

\* 東京大学生産技術研究所 第 3 部

研究速報  
 仮にここで図1(a)の波形を直線上昇波、(b)を指数関数波と呼ぶが、鉄塔のインピーダンスは純抵抗ではないために、同じ波高値、同じ立ち上がり時間の想定電流に対しても、これら2種類の波形に対する鉄塔電位上昇波形はかなり異なってくる。

図2には、縮小モデルで測定した鉄塔上相アーム—導体間の電位上昇波形の直角波電流に対する応答から計算した、種々の流入電流波形に対する電位上昇の波高値を示す。縮小モデルと実物の間の等価性は実測によって実証されている。<sup>2)</sup> モデルは高さ78mの500kV 2回線鉄塔を1/50に縮小したもので、架空地線2条、接地抵抗21Ωである。図2の縦軸はインピーダンス表示で、雷道インピーダンスは400Ωを仮定した。同じ立ち上がり時間2μsでも電流波形の差によって、電位上昇値には30%以上の差があるが、この差はより長い立ち上がり時間、低い接地抵抗のもとでは増大する。

この例からも明らかなように、電流波形は鉄塔電位上昇波形に大きく影響するため、今後雷サージ波形の計算手法が精密化するに従って、標準的な雷撃電流波形の選定はより重要な問題となろう。

3. 雷電流による電磁界変化波形の測定<sup>3)</sup>

対地雷撃電流による電磁界変化は、落雷点から100km以上離れた地点でも測定されるため、データ収集の効率が非常に良く、日本のように自然雷が比較的少ない地域でも、年間に数千例の波形を収集することができる。

電界変化の測定には静電アンテナを使用し、増幅器の時定数は5msとした。磁界変化は同軸ケーブルで構成した直交ループアンテナと、時定数1msの能動積分回路を組み合わせて測定した。測定周波数の上限は共に1MHzである。

地表面を伝搬する電磁波は、大地のもつ抵抗のため、周波数の高い成分ほど減衰する。東京における測定では、15km以上伝搬すると0.5MHz以上の周波数成分はほとんどが失われてしまうが、50km以内の伝搬ならば、それ以下の周波数成分はあまり失われていないことが明らかとなっている。雷撃電流波形の検討のためには、0.3MHzまでの周波数成分が保存されていればさしあたり十分である。対地雷撃に伴う速い電磁界変化波形は非常に特徴があるため、対地雷撃に伴う波形か否かの識別は容易である。<sup>4)</sup> その波頭部分を構成する速い周波数成分は、10km以上を伝搬すると電磁波のモードのみとなるため、電界変化波形と磁界変化波形の波頭部分の形状は同一となる。

電磁界変化波形と雷撃電流波形を結びつける最新のモデルによれば、電磁界変化の波頭部分は、雷放電路上を

上方に向けて伝搬する電流パルスにより生じることが仮定されている。この場合、電流パルスと電磁界変化波形の形状は同一となる。<sup>5)</sup> ただし同モデルは負極性多重雷の後続雷撃に対して提案されたもので、電流値が大きく、工学上重要な第1雷撃や正極性対地雷撃に対するこのモデルの適用の可否についてはまだ十分な検討が行われていない。本報では波頭部分に関してはこのモデルをすべての対地雷撃に適用し、あわせてその妥当性を検討する。

4. 対地雷撃電流の波頭部分の波形

図3(a)に負極性、(b)に正極性対地雷撃に伴う電界変化波形を示す。<sup>3)</sup> 雷撃の極性は、その極性の電荷が雲から大地へ輸送されることで定義する。夏季の落雷はほとんどが負極性である。正極性の下向き放電の電流波形の直接測定例は全世界でこれまでに確認されておらず、電磁界変化波形の観測による間接的な測定が事実上唯一の測定手段となっている。日本では夏季以外にはこの型の落雷の割合が多くなることが判明している。<sup>3)</sup>

表1には東京および新潟で観測された電磁界変化波形の立ち上がり時間に関する統計を示す。<sup>3)</sup> 負極性対地雷

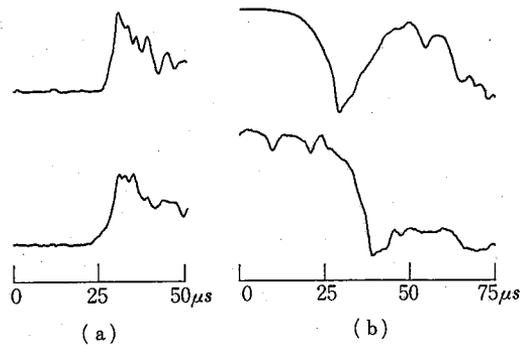


図3 対地第1雷撃に伴う電界変化波形<sup>3)</sup>  
 (a)負極性落雷  
 (b)正極性落雷

表1 対地雷撃に伴う電磁界変化波形立ち上がり時間の平均値  
 (a)10-90% 立ち上がり時間

	極性	立ち上がり時間 (μs)	データ数
新潟 (昭和57年12月~58年2月)	+	8.7	32
	-	3.9	8
東京 (昭和57年5月~7月)	+	7.2	42
	-	3.6	60

(b)0-100% 立ち上がり時間

	極性	立ち上がり時間 (μs)	データ数
新潟 (昭和57年12月~58年2月)	+	23.3	24
	-	7.5	8

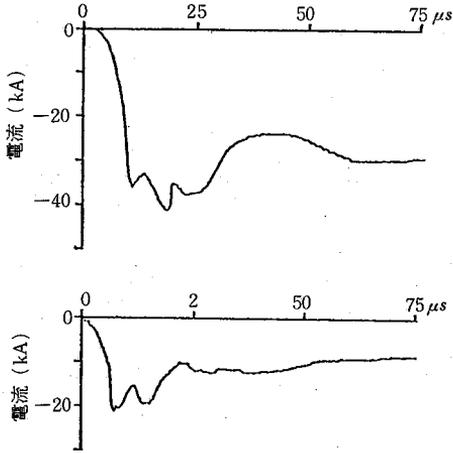


図4 負極性第1雷撃電流波形例<sup>6)</sup>

撃に伴う波形についてはアメリカでも詳細な観測が行なわれており、<sup>4)</sup> これ以外のパラメータと比較しても日本の負極性対地雷撃に大きな差はないことが明らかとなっている。<sup>3)</sup>

図4はスイスで記録された負極性第1雷撃の電流波形の例である。<sup>6)</sup> 波頭部分のみを図3と比較すると、当初ゆるやかに立ち上がって、時間と共にしゅん度が增大しつつ波高値に達する形状は両者に共通であり、本質的に差はない。このスイスで得られた記録から下向きの負極性第1雷撃と思われる70例を抜き出し、0-100%立ち上がり時間を測定したところ、平均値は9.1 μs となった。これと表1の7.5 μs という平均値の間に統計的な有意差はない。なお下向き雷撃とはリーダが雲から地上に向けて降下してくる形式の落雷で、きわめて高い構造物への落雷を除くと、ほとんどすべての落雷がこの型である。

以上により、電磁界変化波形の波頭部分は、対地雷撃電流波頭部分と相似になるとした前節での仮定は否定できないと考えられる。このことから、表1の統計より、正極性対地雷撃電流の立ち上がりは、負極性の2~3倍ゆるやかであることが結論される。

次に立ち上がり部分の形状については、電磁界変化波形は記録された1000例以上のすべてが図1(b)とは正反対の、図3のような形状を示し、スイスで得られた前述の70例の電流波形も2例を除き、すべて同様であった。したがって図1(b)のように上に凸な波形を雷撃電流の標準波形とすることは明らかに不適当であることが結論される。

5. 電流波形を支配する要因

下向き第1雷撃電流波形の立ち上がり部分が図3や図

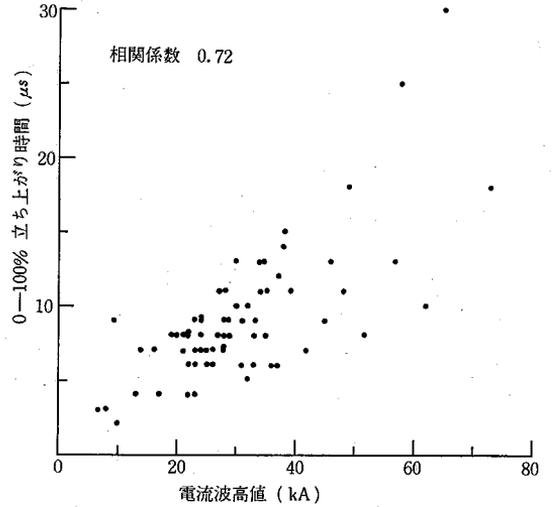


図5 負極性第1雷撃電流波高値と立ち上がり時間の相関

4のように、しゅん度が時間と共に増大するようになる理由についての、一般に認められている定説はまだ存在しない。他方では、10 m までの気中ギャップが雷インパルス電圧の印加によりフラッシュオーバーの際、電流の立ち上がり波形についての研究が、変電所への侵入雷サージ波形に関連して最近注目されており、日本からも有力なモデルが提案されている。<sup>7)</sup> この電流の立ち上がり波形が、雷電流の立ち上がりと同様に、しゅん度が時間的に増大する点が注目される。すなわち下向き雷撃の最終段階においては、数 m 級のギャップがフラッシュオーバーするとき類似の機構で電流が流れはじめることにより、その電流波形の立ち上がり部分の成因が合理的に説明される。詳細な説明は省略するが、このフラッシュオーバー時のモデルに従えば、下向き第1雷撃電流の波高値と、0-100%立ち上がり時間は正の相関を持つこととなる。一方、この両者は無相関というのがこれまでの定説であった。<sup>8)</sup>

磁界変化波形から、その発生源の対地雷撃電流波高値を推定することも可能だが、まだデータの集積が不十分なため、さしあたり前節で用いたスイスの70例のデータを対象として、改めて検討を行った。図5にその結果を示す。ここで電流波高値とは、立ち上がりの急しゅんな部分が終わる時点での電流値で定義しており、立ち上がり時間についても同様である。この定義は、前述のフラッシュオーバー時のモデルに由来するが、架空送電線が直撃雷を受けたときの鉄塔電位上昇の発生機構からも合理性のある定義である。

図5によれば、対地雷撃電流波高値と立ち上がり時間の間には明らかに相関があり、従来の定説を覆すと共に、

## 研 究 速 報

波形の立ち上がり部分の成因についての考え方の妥当性を裏付けるものである。またこの相関の存在は、現在の耐雷設計手法で採用されている日本独自の対地雷撃電流波高値分布を見直す有力な根拠の一つとなる。

## 6. 結 言

対地雷撃電流の立ち上がり部分の波形の重要性について述べ、上に凸の波形を標準とすることは不適當なことを、自然雷の実測結果、および波形の成因の両面から明らかにした。

本研究は一部当研究所選定研究費の補助により行われたものである。  
(1983年11月8日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 池田：「電力系統耐雷設計のための自然雷の研究」電気試験所研究報告 No. 620, 1961, 9
- 2) 河村, 石井, 奥村, 阪部, 木村：「500 kV 送電線雷撃時電位上昇特性のスケールモデルによる検討」昭 55 電気学

会全大 1010, 1980, 4

- 3) M. Ishii, J. Hojo, T. Kawamura and K. Fujikake : "Fast Field Changes Produced by Positive Ground Strokes," 8th Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Fort Worth, pp. 82-1~82-7, 1983, 6
- 4) C. D. Weidman and E. P. Krider : "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms," J. Geophys. Res., 83, C12, pp6239-6247, 1978
- 5) Y. T. Lin, M. A. Uman and R. B. Standler : "Lightning Return Stroke Models," J. Geophys. Res., 85, C3, pp1571-1583, 1980
- 6) K. Berger : "Methods and Results of Research on Lightning on Mt. San Salvatore 1963-1971," Bull. ASE, 63, 24, pp1403-1422, 1972, 11
- 7) 新藤, 鈴木：「放電のシミュレーション (その2)」電研研究報告 182048, 1983, 5
- 8) 「送電線耐雷設計基準要綱」電研研究報告 71037, 1971, 9