落雷位置標定システムによる近畿地方の 雷観測結果

正員 山田 勝 (関西電力)
正員 永井 敏雄 (関西電力)
正員 園井 康夫 (関西電力)
正員 石井 勝 (東京大)
正員 北條 準一 (東京大)

Results of Lightning Observation in Kinki District by Direction Finder Network

Masaru Yamada, Member, Tosio Nagai, Member, Yasuo Sonoi, Member (Kansai Electric Power Co., Inc.), Masaru Ishii, Member, Jun-Ichi Hojo, Member (University of Tokyo)

(1) As the LLP System calculated the current to be 2.3 times that of the true current, we adjusted it correctly.

(2) We graphed the cumulative frequency distributions curves of lightning current amplitudes for each season and polarity. The curves for negative polarity resemble a logarithmic normal distribution curve, but the curves for positive polarity don't. The current values of 50% are similar to the observed datas in Niigata.

(3) When we changed the criteria of electromagnetic field waveform of Cloud-to-Ground (CG) lightning in winter, we were able to improve the detection efficiency of the system from 40% to 70%. We found that the electromagnetic field waveforms of lightning to high structures are different from the ones of CG lightning. And before we changed the criteria, the detection efficiency in summer lightning was more than 70%.

(4) We made the detection efficiency curves for each distance and from the curves constructed lightning frequency level maps.

キーワード：落雷位置標定システム, 冬季雷, 夏季雷, 雷撃電流累積頻度分布, 捕捉率, 落雷頻度マップ

1. ま え が き

昭和49年ごろより、11月ごろからの寒波により発生する冬季雷により日本海沿岸に位置する原子力発電所からの500 kV送電線などに2回線にまたがる多相事故が夏季雷に比べ比較的多く発生した。この事故メカニズム解明と事故防止対策を目指して、著者らは磁界による落雷位置標定システム⁽¹⁾(LLPシステムと略記)をはじめとして各種の観測装置により精力的に観測を実施してきた結果、冬季雷の特徴と事故のメカ

ニズムが次第に明かになってきている⁽²⁾⁽³⁾。

ここでは、落雷位置標定システムによる近畿地方の雷観測で現在までに得られた、(i)雷撃電流波高値の精度と累積頻度分布、(ii)システムの雷捕捉率とその向上対策の結果、(iii)地域別の落雷頻度マップについて、その概要を報告するものである。

2. システムの概要

本論文に用いた落雷位置標定システムは、図1に示すように近畿地方の北部に設置した日本海システムと

図 1 観測システムの配置
Fig. 1. Location of observation system.

呼んでいるシステムで、落雷方位測定装置(DF)の検出感度は中感度(公称検出範囲 20~200 km)に設定している。このシステムの詳細については文献(1)を参照されたい。なお、ここで分析したデータは稼働率が高く、正および負の落雷が捕捉できる日本海システムの観測データを用いた。

小浜に設置した DF については、DF およびシステムの雷捕捉状況の検証のため、DF の直交ループアンテナ、電界アンテナを利用して電磁界波形収集システム⁽⁴⁾を設置している。

3. 雷撃電流波高値の観測結果

〈3・1〉 雷撃電流の感度校正 帰還雷撃電流により発生する電磁界変化波形の立上り部分の発生機構が伝送線路モデルに従うとすると、雷撃電流 I と磁界変化波形の波高値 B との間に次の関係が得られる⁽⁵⁾。

$$I = \frac{2\pi c D}{\mu_0 v} B \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 c : 光速、 D : 落雷点までの距離、 μ_0 : 真空の透磁率、 v : 放電路上の電流進行波速度 (c の $1/3$ を使用⁽⁶⁾)

LLP システムのマニュアル⁽⁷⁾では中感度の場合、当初(2)式により雷電流を算出するよう推奨されていたが、式の中の数値の根拠は明らかではない。現在は(3)式のとおり、(2)式の分母の 149 の代わりに 218 が推奨値となっている。この改訂された換算式は、著者らが行った平地に設置された DF 局の感度測定⁽⁸⁾の結果とほぼ一致した。

$$I = S \cdot D / 149 \quad (\text{kA}) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S : DF が出力する磁界信号強度に比例した数値、 D (km)

現在は

$$I = S \cdot D / 218 \quad (\text{kA}) \dots\dots\dots (3)$$

改訂前の(2)式を観測結果に適用すると、電流波高値の累積頻度分布の 50% 値は他所で得られている観

図 2 雷撃電流波高値の累積頻度分布曲線
Fig. 2. Cumulative frequency distributions of lightning current amplitudes.

測例に比べ、かなり大きくなった⁽⁹⁾。この疑問点を解消するため、平面波とみなせるような数十 km 以上離れた局からの長波帯の放送波(茨城県名崎の 40 kHz 標準電波 JG 2 AS)を利用して DF の感度を校正した⁽⁶⁾。この結果、小浜、亀岡、彦根の各 DF で多少のばらつきはあるものの、改訂前の(2)式を観測値にそのまま適用して算出した電流値は、(1)式で推定される値の約 2.3 倍となっていたことが判明した。この原因は当初の(2)式の中の数値の誤りに加え、DF のアンテナが鉄筋コンクリート構造物上に設置してあることが、受信される信号強度に影響を及ぼしたためとみられる。1989 年 4 月より各 DF を感度校正して観測をしている。

〈3・2〉 雷撃電流波高値の分布 一般に、LLP システムで得られたデータをそのまま統計処理すると、DF の有限なダイナミックレンジのため真の分布形からややひずんだ形状になる。すなわち、遠方の落雷の中では小電流のものが検出されず、近傍では逆に大電流のものが DF への入力が高くなり検出されなくなる。従ってここでは、10~75 km と 75~200 km に区分した距離別の電流分布を求め、前者は小電流域が、後者は大電流域の分布が正しいと仮定してひずみ補正することにより、真に近い電流分布を推定できる⁽⁶⁾。この方法により求めた分布が図 2 であり、新潟地域に

図 3 大電流雷撃 (300 kA 以上) の分布
 Fig.3. Distribution of lightning strokes with high current.

おける観測結果⁽⁶⁾と類似の結果になっているが、Berger らの観測⁽¹⁰⁾や耐雷設計ガイドブック⁽¹¹⁾と比べると、夏季負極性の中央値は 30% 程度高くなっている。分布形状は負極性は夏季冬季ともに対数正規分布といえるが、正極性は対数正規分布とは多少はずんだ形状になっている。また、冬季、正極性の大電流雷撃の比率が高くなっている。

〈3・3〉 大電流雷撃の頻度 1985 年 11 月 27 日に観測を開始してから 1989 年 3 月 31 日まで観測された電流を補正して 300 kA 以上の分布を示したのが図 3 である。DF のダイナミックレンジの影響で大電流雷撃は遠方で 28 件観測されており最大値は 453 kA である。このうち、冬季は 20 件 (71%) で大電流雷撃の比率が高くなっている。

4. 落雷位置標定システムの捕捉率

LLP システムの捕捉率を左右する要素として、(i) 対地雷撃を識別するのに用いられる波形識別パラメータの季節変化⁽¹²⁾により違うことによるもの、(ii) 雷撃電流の波高値が距離の関数で、かつ DF のダイナミックレンジが有限であることにより捕捉率が距離の関数となることによるもの⁽⁶⁾ (ここでは捕捉特性と呼ぶ)、(iii) DF などの信号処理能力によるもの、(iv) 電波伝搬する途中の山岳地形などに遮へいされ捕捉できないことによるもの、などが考えられる。ここでは (i)、(ii) の項目について検討した。

〈4・1〉 波形識別基準に関係する捕捉率 この捕捉率は、DF アンテナで受信する電磁界波形と DF が雷と識別して出力するデータを比較分析することによりつかむことができる。観測装置の詳細は文献 (4) を

図 4 対地雷撃の電界波形例
 Fig.4. Example of Electric field waveform of cloud-to-ground lightning stroke.

波形識別項目	極性	基準値 (中感度)	
		変更前	変更後
立ち上がり時間 (tr)	(H)	正, 負 24μs 以内	30μs 以内
時間 (td)	(L)	正, 負 20μs 以内	24μs 以内
ゼロクロス時間 (td)	正, 負	12μs 以内	両方
セカンドピーク比 (Vp2/Vp1)	正, 負	1.25 以内	両方
両極性振動比 (Vp3/Vp1)	正	0.50 以内	0.70 以内
	負	0.75 以内	0.90 以内

注) (H) 中感度 DF で信号入力力が約 60 nT 以下のとき⁽⁶⁾
 (L) 中感度 DF で信号入力力が約 60 nT 以上のとき

図 5 落雷の波形識別項目と基準値
 Fig.5. Discriminative items and criteria about electromagnetic field waveform of lightning.

参照されたい。

対地雷撃の特徴は Weidman および Krider によれば、帰還雷撃に伴い、電磁界波形の立ち上がり部が 1~数 μs にわたり、比較的緩やかに上昇する部分 (スローフロント) とこの後、急しゅんに立上ってピークに至る部分 (ファーストランジション) が認められるとしている⁽¹³⁾。この特徴を区分の基本として、まず得られた電磁界波形データを大きく対地雷撃波形 (波形例を図 4 に示す) とそれ以外の波形 (雲放電を含む) に区分する。更に冬季雷については後で詳述するように、電磁界波形の形状からも大地に代表される比較的フラットな地形への雷撃 (平地雷撃と呼ぶ) と送電鉄塔に代表される高構造物への雷撃 (高構造物雷撃と呼ぶ) に分類して分析が必要があるが、本論文では文献 (13) の特徴を備えた波形 (平地雷撃) のみを対地雷撃として分析を行った。この点は今後の検討課題としたい。この対地雷撃波形のうち、上記で区分されたデ

ータについて図5に示す立上り時間、ゼロクロス時間、セカンドピーク、両極性振動の各識別項目について検討した。その識別基準値を併せて図5に示す。

冬季、夏季の電界波形の各識別項目を分析すると共に、基本条件としてDFが帰還雷撃と認識して捕捉しているか？次に、LLPシステムとしての捕捉率（3DF運用であり、1局が捕捉しなくても他の2局が捕捉すればよい）を、更にはDFが捕捉しない原因の波形パラメータの分析を行い、総合的にまとめたのが表1である。波形パラメータで一番影響を受けるのは冬季、夏季ともに両極性振動であり、北條らの観測⁽⁶⁾と同様の結果で、次にゼロクロス時間のパラメータであることがわかる。後者は雲放電を排除するうえでは有効なパラメータである。日本海システムは識別基準を1988年11月に変更し、その前後で捕捉率がどのように変化したかも検討している。文献(14)においては、基準値変更により対地雷撃を平地雷撃と高構造物雷撃

に区分した場合、前者ではLLPシステムの捕捉率が約40%から70%に向上することを報告したが、1日のみのデータに基づいたこの結果には偏りがある可能性もあるため、気象状況の異なる日を含めて処理日数を増やして検討した結果、表1に示すように同様の結果となり、平地雷撃については基準値変更により捕捉率向上は可能であることが確実となった。

しかし、冬季雷による高構造物雷撃についてはほとんど標定していない⁽⁴⁾⁽¹⁴⁾。基準値変更後、275kV送電線のトリップ事故を引起した雷撃を好運にも標定したときの電磁界波形を図6に示す。受信した第1波形はゼロクロス時間が短いため対地雷撃による波形とは認識されず、第2波形が認識されて標定が行われたものと考えられる。夏季雷についても、基準値変更前の波形について分析を行った結果を表1に示す。これによると、日本における夏季雷は基準を変更しなくても74%の比較的高い捕捉率を有し、新潟地方にお

表1 波形識別クライテリア変更前後における電界波形の波形識別パラメータ分析と捕捉率の変化状況および捕捉しない原因の分析

Table 1. Analyses of discriminative parameters of electric field waveform and change of detection efficiency non-detective causes of winter and summer lightning.

電 界 波 形 の バ ラ メ ー タ 分 析	識別基準項目	極性	区 分	冬季データ						夏季データ		
				基準値変更前データ			基準値変更後データ			基準値変更前データ		
				基準値	基準値内	基準値外	基準値	基準値内	基準値外	基準値	基準値内	基準値外
波 形 の バ ラ メ ー タ 分 析	立ち上がり時間(tr)	正	件数 (%)	55(98.6)	2 (3.6)		30μs	117(98.3)	2 (1.7)	24μs	18(100)	0 (0)
			平均値(標準偏差)	24μs	11.2 μs(4.75μs)		以内	18.1 μs(5.32μs)		7.5 μs(2.95μs)		
		負	件数 (%)	21(100)	0 (0)		以内	102(100)	0 (0)	109(100)	0 (0)	
				平均値(標準偏差)		7.8 μs(2.57μs)			9.5 μs(3.44μs)			
	ゼロクロス時間(td)	正	件数 (%)	50(87.7)	7(12.3)		12μs	101(84.9)	18(16.1)	12μs	17(84.4)	1(5.6)
			平均値(標準偏差)	12μs	33.5 μs(22.97μs)		12μs	37.9 μs(40.4μs)		31.6 μs(20.91μs)		
		負	件数 (%)	17(81.0)	4(19.0)		以上	62(80.8)	40(39.2)	109(100)	0 (0)	
				平均値(標準偏差)		32.4 μs(18.78μs)			20.7 μs(38.58μs)		46.6 μs(13.32μs)	
	ピーク	正	件数	1.25	2	0	1.25	3	1	1.25	1	0
		負	件数	1	0		5	0		1	3	
両極性振動		正	件数 (%)	0.50	37(64.9)	20(35.1)	0.70	109(91.6)	10(8.4)	0.50	14(77.8)	4(27.2)
		平均値(標準偏差)	以内	0.47(0.22)		以内	0.42(0.20)		以内	0.38(0.16)		
	負	件数 (%)	0.75	15(71.4)	6(28.6)	0.90	95(94.1)	6(5.9)	0.75	91(83.5)	18(16.5)	
Vp3 Vp1		平均値(標準偏差)	以内	0.58(0.29)		以内	0.84(0.22)		以内	0.57(0.18)		
	件数計	正極性		5 7 (73.1%)			1 1 9 (53.8%)			1 8 (14.2%)		
		負極性		2 1 (37.9%)			1 0 2 (46.2%)			1 0 9 (85.8%)		
		合計(A)		7 8 (100%)			2 2 1 (100%)			1 2 7 (100%)		
ド ア テ ナ が ない 波 形 の 観 測 分 析	(A)のうちDFで→有の件数=(B)				4 6			1 5 8			8 8	
	DF単独の捕捉率=(B/A*100%)				5 9 . 0 %			7 1 . 4 %			6 9 . 3 %	
	(A)のうちPA標定で→有の件数=(C)				3 0			1 5 8			9 4	
	システムの捕捉率=(C/A*100%)				3 8 . 5 %			7 1 . 4 %			7 4 . 0 %	
	両極性振動		1 5 (48.9%)			1 3 (20.6%)			1 5 (38.5%)			
		立ち上がり時間		0		1 (1.6%)			0			
		ゼロクロス時間		3 (9.4%)			2 0 (31.7%)			1 (2.6%)		
	セカンドピーク		1 (3.1%)			1 (1.6%)			0			
	両極性振動と立ち上がり時間		2 (6.3%)			0		BPR&P	2 (5.1%)			
	両極性振動とゼロクロス時間		1 (3.1%)			0			0			
不明		1 0 (31.2%)			2 8 (44.5%)			2 1 (53.8%)				
計		3 2 (100%)			6 3 (100%)			3 9 (100%)				
備考	データ取得期間				1987.12.20~12.21 1988.1.21~1.28 1988.2.6~2.7			1988.11.24~28.12.15~18 1989.12.27~29 1989.1.16~17			1988.6.4~6.9 1988.8.25

(a-1)電界 第1波形

(a-2)第2波形 (1番目のスタートより1s以内)

(b-1)NS方向磁界 第1波形

(b-2)第2波形 (1番目のスタートより1s以内)

図 6 鉄塔雷撃時に DF が受信した電磁界波形 (1989: 03: 17 04: 25: 55)

Fig. 6. Electromagnetic field waveforms of tower lightning by DF antenna.

(a) 冬季 (11~3月)

(b) 夏季 (4~10月)

図 7 LLP システムの捕捉率曲線
(1986~1988 データ)

Fig. 7. Detection efficiency curves of LLP system (datas from 1986 through 1988).

る北條らの観測⁽⁶⁾、フロリダにおける Peckham ら⁽¹⁵⁾の観測結果に類似していることが判明した。また、冬季雷による鉄塔雷撃のような複雑な波形はほとんど見られなかった。

〈4・2〉 捕捉率の距離特性 本章で記したように、

DF のダイナミックレンジの関係で捕捉率が距離により異なるため、この特性を求めるのに、まず各 DF 受信信号強度分布を作成し、受信可能な最大、最小信号強度を求める。この信号強度を基に各距離ごとに検出できる最大電流、最小電流を算出する。次に、図 2 で求めた雷撃電流累積頻度分布より検出できる最小電流までの累積%と最大電流までの累積%を求め、その差を求めると、任意の距離における捕捉率が求められる。

〈4・3〉 総合捕捉率 上記〈4・1〉、〈4・2〉節で求めた 2 種類の捕捉率より、これらを考慮した総合捕捉率が求められる。これを季節別、極性別に求めグラフにしたのが図 7 である (同図において先の波形識別基準に関する捕捉率について夏季が 74% を、冬季が 38.5% を用いた)。これによれば、夏季は捕捉率が約 70% と冬季の約 40% に比べ高いことがわかる。この結果は新潟地方における観測と⁽⁶⁾同様である。

5. 落雷頻度マップ

落雷頻度マップの作成は、北緯 33~37 度、東経 134~138 度を各 15 分ずつのメッシュに区切って (IKL 相当) 1986 年度から 1988 年度に観測された落雷位置データについて、そのメッシュ内の年・季あたりの頻度を求め、その数値を〈4・3〉節の総合捕捉率により補正して求めた。捕捉率はメッシュの中心から最も近距離にある DF は捕捉すると仮定し、LLS が標

(a) 冬季 (11~3月) の落雷頻度マップ

(b) 夏季 (4~10月) の落雷頻度マップ

日本海システム 1986~1988年度の年平均値

図 8 落雷頻度マップ

Fig. 8. Lightning frequency level maps.

定するためにはメッシュの中心から2番目の距離にあるDFが標定すればよいから、その距離における捕捉率をそのメッシュにおける捕捉率として補正した。これらにより得られた季節別の正および負の落雷全数の頻度マップを図8に示す。

6. ま と め

本論文をまとめると、次のとおりである。

(1) DF アンテナの感度校正を行った結果、磁界による落雷位置標定システムのマニュアルに従って、当初算出していた雷撃電流値は妥当な推定値の約2.3倍となっていたことが判明した。原因はマニュアルの

数値の誤りに加え、各DFサイトが鉄筋コンクリート構造物の上であるなどの、サイト悪条件によるものと推定される。

(2) 雷撃電流波高値の累積頻度分布を季節別、極性別に作成した。負極性は夏季冬季とも対数正規分布をなすが、正極はその分布形状を示さない。電流値の中央値は新潟地方の観測と類似する。

(3) LLPシステムの捕捉率について、波形パラメータによるものとDFのダイナミックレンジに伴う距離特性について検討した。前者は、冬季の場合、平地雷撃は波形識別基準値を変更することにより、捕捉率向上は可能である。鉄塔などの高構造物雷撃については、その電磁界波形の形状が平地雷撃とは違うことが明確になった。また、夏季の場合、基準値変更前でも捕捉率は70%以上あることが判明した。

更に、上記の波形パラメータによる捕捉率と捕捉率が距離特性をもつことの両方を考慮した総合捕捉率曲線を作成した。

(4) 上記の総合捕捉率曲線を基に真に近い季節別の雷撃頻度マップを作成した。

今回の分析により近畿地方における雷撃電流の波高値の頻度分布、LLPシステムの捕捉率、落雷頻度マップを明らかにした。このなかで夏季の捕捉率が高いので問題ないが、冬季は我々が最も重要視する鉄塔雷撃をほとんど標定せず、この現象の解明と落雷頻度マップの送電線雷事故率検討など、設計面への適用が今後の課題である。

(平成2年5月25日受付、同2年8月30日再受付)

文 献

- (1) Binford, et al.: "Wideband Magnetic Direction Finder Networks for Locating Cloud-to-Ground Lightning", 1983 Int. Aerospace And Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Fort Worth, 50 (1983)
- (2) 水野, 他: 「500 kV 送電線2回線事故様相の考察」, 電気学会放電・高電圧合同研究, ED-88-87; HV-88-48 (昭63)
- (3) 山田, 他: 「落雷位置標定システムによる雷観測結果について(その2)」, 同上, ED-89-94; HV-89-37 (平元)
- (4) 水野, 他: 「落雷位置標定システムの方向探知アンテナによる電磁界波形観測と識別」, 同上, ED-88-85; HV-88-46 (昭63)
- (5) Y. T. Lin, et al.: "Lightning Return Stroke Models", J. Geophys. Res., 85 (1980)
- (6) 北條, 他: 「落雷に伴う電磁界変化波形の特性と評価法」, 電学論B, 108, 165 (昭63-4)
- (7) LIGHTNING LOCATION AND PROTECTION, INC.: Operating Manual Lightning Position Analyzer Model PA80-02 Oct. 24 1984
- (8) M. Ishii & J. Hojo: "Calibration of Wideband Magnetic Field Measuring System for Observation of Lightning", Trans. IEE of Japan, 108, 121 (1988)
- (9) 水野, 他: 「落雷位置標定システムによる雷観測結果について」, 電気学会放電・高電圧合同研究, ED-87-86; HV-87-33 (昭62)

- (10) K. Berger, et al.: "Parameters of Lightning Flashes", *Electra*, No. 41, 23 (1975)
- (11) 耐雷設計基準委員会: 「送電線耐雷設計ガイドブック」, 電中研研報, No.175031 (昭51)
- (12) M. Ishii & J. Hojo: "Statistics on Fine Structure of Cloud-to-Ground Lightning Field Waveforms", *J. Geophys. Res.*, **94**, 13267 (1989)
- (13) C. D. Weidman, et al.: "The Fine Structure of Lightning Return Stroke Wave Forms", *ibid.*, **83**, 6239 (1978)
- (14) 園井, 他: 「落雷位置標定システムによる冬季雷の捕捉について」, 平元電気学会全大, 1192
- (15) P. W. Peckham, et al.: "Lightning Phenomenology in the Tampa Bay Area", *J. Geophys. Res.*, **89**, 11789 (1984)

山 田 勝 (正員)

昭和31年12月29日生。52年3月岐阜工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在, 同社総合技術研究所勤務。主として, 雷および送電に関する研究に従事。

永 井 敏 雄 (正員)

昭和30年2月27日生。50年3月石川工業高等専門学校電気工学科卒業。同年4月関西電力(株)入社。現在, 同社総合技術研究所勤務。主として, 雷および送電に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

園 井 康 夫 (正員)

昭和27年12月5日生。52年3月京都大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年4月関西電力(株)入社。現在, 同社総合技術研究所勤務。主として, 雷および送電に関する研究に従事。

石 井 勝 (正員)

昭和24年3月11日生。51年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月同大学助教授, 生産技術研究所勤務, 現在に至る。工学博士。主として, 系統絶縁, 自然雷, 高電圧現象の測定に関する研究に従事。平成元, 2年度電気学会東京支部評議員。IEEE Senior Member。

北 條 準 一 (正員)

昭和15年2月10日生。37年3月千葉工業大学電気工学科卒業。同年4月東京大学生産技術研究所勤務, 現在に至る。主として, 雷および高電圧工学に関する研究に従事。日本大気電気学会会員。