

雷放電カウンタによる対地放電の実測

大 矢 征

Field Measurement of Cloud-to-ground Lightning with the Lightning Flash Counter

Susumu OHYA

Abstract

The number of cloud-to-ground lightning flashes per year at a particular location is very important for the lightning proof design of transmission line. The frequency of lightning flashes can be measured by the CIGRÉ type lightning flash counter which is actuated by the sudden electric field change produced by a lightning stroke.

It is considered that all the counted numbers do not only indicate the number of cloud-to-ground lightning flashes, but the number of intracloud flashes in the large possibilities.

To separate the above two types of flash, two CIGRÉ type antenna were installed. On one of these, the CIGRÉ type counter and on the other the Malan type counter, which detects the ground flash, have been connected and the results of actual field measurements by both counters were compared.

Also, in the near place, lightning flashes were counted with another counter with a vertical antenna instead of the CIGRÉ type horizontal antenna which requires large area. The results obtained are in good agreement with the CIGRÉ type arrangement, and it was found that the use of this vertical antenna is a practical method to replace the CIGRÉ type antenna.

1. ま え が き

架空送電系統に発生する事故原因の中、約 50% は雷によるものである。したがって信頼度の高い電力供給を行うために雷害事故の少ない送電線を建設することを目標に、送電線の耐雷設計について長年にわたり検討が行われてきた。

耐雷設計の最も基本となるのは雷撃電流の特性^{1),2)}と送電線経過地の襲雷頻度³⁾である。雷撃電流については世界各国で実測が行なわれて多数のデータが集積され、耐雷設計に使用可能な雷撃電流頻度分布が得られている。一方、襲雷頻度については人間の耳や目による観測で年間雷雨日数 (IKL) の値を統計的に出し、各地の雷雨日数分布図が得られている。しかしながら、最も重要なことはある地域における年間の落雷数を知ることである。そこで、これらを実測するために約 10 年程前、雷放電カウンタ^{4),5)}を用いて雷放電に伴う地上の電界変化

を静電アンテナでとらえ計数するという方法が CIGRE において提案され、現在も世界各国で統一された方式により実測が行われ、IKL 図に代る雷放電度数分布図が得られつつある。

ところが、上記のカウンタは落雷だけでなく雲間放電でも動作することがあるので、これらを分離する目的で雷放電の電波波形の特徴をとらえて動作する Malan⁴⁾ 式カウンタが考案された。

一方、CIGRE 式で用いられる水平アンテナは広い設置面積を必要とするので設置場所は大きな制約を受ける。そこで最近これを改善するために垂直アンテナ^{6),7)}を立てて、カウンタにより放電度数を実測し、両者の比較検討が行われている。

筆者は神奈川県中央に位置する本大学内に CIGRE 式静電アンテナ 2 基を設け、1975 年 7 月より CIGRE 式カウンタと Malan 式カウンタによる実測を行ってきた。また、1976 年 8 月から垂直アンテナを設置して、CIGRE 式カウンタと同じ周波数特性をもつトランジス

* 昭和 51 年 11 月 4 日受理

タ式を用いて、同時に実測を行っている。

これまでの2年間は比較的雷が少なく、いまだ十分なデータは得られていないが、これまで結果の概要を取りまとめて報告する。

2. 実測の原理

2.1 対地放電 (cloud-to-ground lightning)

図1に示すように雷雲の電荷を $-Q[C]$ 、雲底の地上高を $H[m]$ として、 $D[m]$ 離れた点 P での地表面近くの垂直方向電界強度は次のようにして求められる。地球を導体と仮定すれば、影像法により $+Q[C]$ の影像電荷から雷放電により電流 I が流れるものと考えることができるので、これによるダイポールモーメントは次式で表わされる。

$$M = 2QH = 2\int I(t) H(t) dt \quad (1)$$

この落雷の機構は複雑であるが、一般にはステップリ

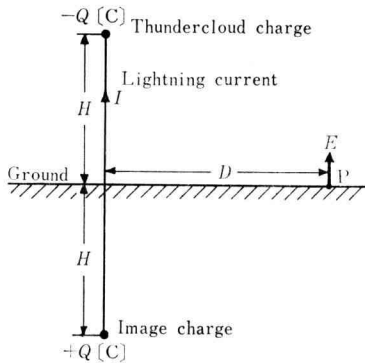


Fig. 1 Model for the calculation of the electric field intensity at P for a return stroke.

ーダによって開拓された放電路中を雷雲と逆極性の電荷が流れ、いわゆるリターンストローク (主雷撃) を形成する。対地放電の場合に 10 km 以上の距離で検出される電界変化としては、ステップリーダによるものはきわめてわずかで、大部分はリターンストロークによるものである。リターンストロークの諸特性を第1表に示す⁸⁾。

雷撃電流波形は $2 \times 40 \mu\text{sec}$ 、最大電流 $I_m [kA]$ は観測者によって異った値が実測されているが、代表値は $10 \sim 20 kA$ であり全落雷の 95% は $65 kA$ 以下である。この雷撃電流波形を次式で指数関数近似する。

$$I(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

ただし、 I_0 : 定数

$$\alpha = 1.88 \times 10^4 / \text{sec}$$

$$\beta = 1.60 \times 10^4 / \text{sec}$$

(2) 式より最大電流 I_m と波頭時間 t_m は次式となる。

$$I_m = I_0 (e^{-\alpha t_m} - e^{-\beta t_m}) \quad (3)$$

$$t_m = \frac{\ln(\alpha/\beta)}{\alpha - \beta} \quad (4)$$

また、リターンストローク先端の地上高は

$$H(t) = V_0 t_k (1 - e^{-t/t_k}) \quad (5)$$

で近似できる。ここで、 V_0 はリターンストロークの初速度、 t_k は雲底に到達するまでの時間で次の値をとる。

$$V_0 = 1.58 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

$$t_k = 30 \times 10^{-6} \text{ sec}$$

一方、Maxwell の電磁界方程式より、 P 点での電界の強さは次式で表わされる。

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{M}{D^3} + \frac{1}{cD^2} \cdot \frac{dM}{dt} + \frac{1}{c^2D} \cdot \frac{d^2M}{dt^2} \right] = E_S + E_I + E_R \quad (6)$$

Table 1 Properties of return stroke.

	Minimum	Representative	Maximum
Current rate of increase, $kA/\mu\text{sec}$	$1 <$	10	>80
Time to peak current, μsec	<1	2	30
Peak current, kA		$10 \sim 20$	110
Time to half of peak current, μsec	10	40	250
Channel length, km	2	5	14
Velocity of propagation, m/sec			
Lower 1/3 of channel		1.6×10^8	
next 1/6 of channel		2.1×10^8	
next 1/4 of channel		0.97×10^8	
next 1/4 of channel		0.55×10^8	

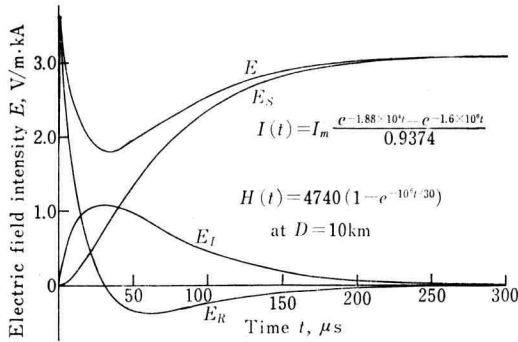


Fig. 2 Electric field components due to 1 kA discharge at 10 km distance.

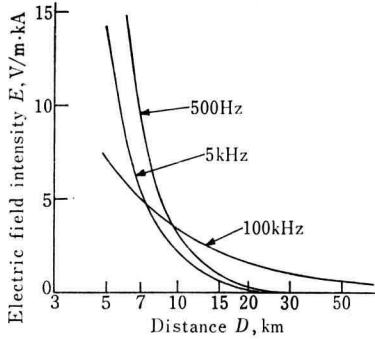


Fig. 3 Electric field intensity due to 1 kA discharge at the ground.

ただし、 $c = 2,998 \times 10^8$ m/sec (光速度)
 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m (真空の誘電率)

(6) 式の E_S は静電界成分、 E_I は誘導成分、 E_R は放射成分を表わす。

図2は(6)式に、(1)~(5)式および各定数を代入して、10 km 地点における各電界成分を求めたもので、 E の最大値は約 $1.1 \mu\text{sec}$ において $3.65 \text{ V/m}\cdot\text{kA}$ である。図3は距離に対する合成電界の強さを周波数をパラメータとして求めたものであり、この値に I_m [kA] とアンテナの高さを乗ずれば誘起電圧が得らる。

雷放電カウンタは 500 Hz 付近を通過させる周波数特性のフィルタを備えているので図3に示すとおり 10 km 以上では 100 kHz 成分の方が大きい、この分はカットされ主として静電界成分により動作する。

カウンタの感度は CIGRE の規格によると、電界の強さが 5 V/m 以上で動作することになっている。 I_m は種

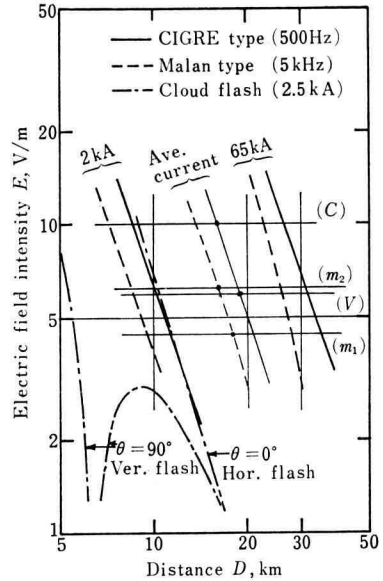


Fig. 4 Electric field intensity due to lightning and cloud flash current. (See 4.1 to (C), (m_1) , (m_2) and (V))

々の値をとるので、いま全放電回数のおよそ 5% は 65 kA 以上、95% は 2 kA 以上であるとすれば、図4に示すように全落雷数の 5% および 95% を計測できる最大距離はそれぞれ 33 km および 10.6 km となり、雷撃電流の代表値である 10~20 kA に対しては 18~23 km となる。

3.2 雲間放電 (cloud flash) の分離計測

雲間放電について図5に示すようなモデルを考え、放電路の中心点を S、そこから地面におろした垂線と地面との交点を O とし、O から d [m] の観測点 P における放電電流 I による電界の強さを計算する。

図1と同様に大地による影象を考え、P 点の対地垂直方向の電界の強さを E とする。球座標を用いると E は次のように表わされる。

$$E_{\theta+\delta} = \frac{jk}{4\pi\epsilon_0 c} \left(\frac{1}{(jkr)^2} + \frac{1}{jkr} + 1 \right) \frac{e^{-jkr}}{r} Il \sin(\theta+\delta) \cos\phi \quad (7)$$

$$E_r = \frac{jk}{4\pi\epsilon_0 c} \left(\frac{1}{(jkr)^2} + \frac{1}{jkr} \right) \frac{e^{-jkr}}{r} Il \cos(\theta+\delta) \cos\phi \quad (8)$$

$$E = 2 (E_{\theta+\delta} \cos\delta + E_r \sin\delta) \quad (9)$$

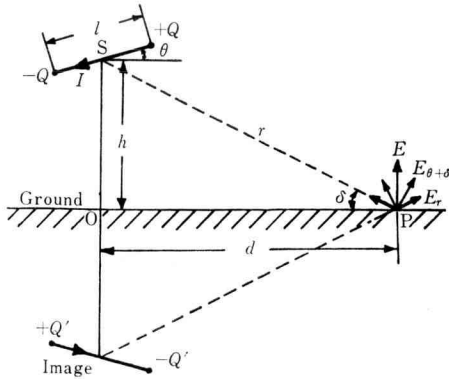


Fig. 5 Model for the calculation of the electric field intensity at P for cloud discharge.

ここで、 $k=2\pi f/c$ 、 δ は地面とPSのなす角、 θ はIが水平面となす角、 ϕ はIがPOS面となす角である。

(7)~(9)式で、 $r=\sqrt{d^2+h^2}$ 、 $\delta=\tan^{-1}h/d$ であり、Iは雲間放電のK変化⁹⁾における最大振幅周波数と測定器の選択周波数の関係から約1/5.4に減衰するので $E_c = \frac{1}{5.4} E$ として θ 、 d を変化させて雲間放電に対するアンテナ入力電界強度 E_c を計算した。

ここで $l=3$ km、 $h=4.5$ km、 $\phi=0$ 、 $f=500$ Hzと仮定した。雲間放電のK変化による平均電流波高値は1~4 kAと報告されている⁹⁾ので $I=2.5$ kAとし、水平方向放電 ($\theta=0^\circ$) と垂直方向放電 ($\theta=90^\circ$) について計算した結果を図4に示した。これから雲間放電の平均的電流値に対する動作距離は5 V/m に対して $\theta=0^\circ$ では11 km、 $\theta=90^\circ$ では5.5 kmであるといえる。すなわち水平方向放電の方が検出されやすい。しかし、 $\theta=90^\circ$ の場合でも、電流値または測定器の感度が5倍であれば、 $d=6.5$ km 付近を除いて $\theta=0^\circ$ と同じに動作する。この6.5 km という値は上記モデルの放電位置に対して、静電界成分の符号が反転する距離である。平均電流における値を50% 動作距離と考えると、5 V/m に対しては上記のように対地放電では $R_g=20$ km、雲間放電では $R_c=11$ km 以上である。Prentice 氏ら¹⁰⁾ は実測によって $R_g=30$ km、 $R_c=20$ km という値を得ている。

以上、CIGRE 式カウンタは雲間放電の場合も対地放電の動作距離の約50% 位の距離までカウントすることを示した。Malan 氏は、雲間放電の放射成分は1 kHz、10 kHz においてそれぞれ対地放電の1/40、1/10 であり、100 kHz では大体等しいということから両放電を分離する方法を考案した。すなわち、周波数帯域が3~

30 kHz では雲間放電におけるK変化と対地放電におけるリターンストロークの最大振幅の比は1:5 であり、そのときの周波数は8 kHz と5 kHz であるから、5 kHz 成分とどの放電にも含まれている100 kHz 成分との同調回路を作り、雲間放電のときの両波形と大きさを等しく調整しておけば、対地放電では5 kHz 成分が大となるのでこのときのみカウンタは動作する。したがって、この方式を使用すれば対地放電と雲間放電を分離計測することができる。

3. 実測場所と計測器

3.1 実測場所とアンテナ

幾徳工業大学内グラウンドの東端にCIGRE 式静電アンテナ(総長19 m、線長1.4 m で線間距離15 cm 6条、高さ5 m)を2基約3 m 離して直線状に配置し、それらの間に高さ1.5 m の観測箱を設け、箱内には後に述べるカウンタ類の外、温湿度記録計を納めた。垂直アンテナは中央部から約5 m 離れた所に直径38 mm 長さ3.7 m のパイプの先端に直径62.5 mm の球を取りつけ、アングル台と長さ50 cm のポスト 碍子でこれを支持し、地上高5 m となるようにした。これら3つのアンテナは降雨時でも100 M Ω 以上の絶縁抵抗を保ち、接地抵抗は62 Ω であった。対地静電容量は静電アンテナが260 pF、垂直アンテナは90 pF である。また近くに電気工作物や高い建物もなく実測に適した場所であるといえる。

神奈川県中央部に位置しているため、IKL は約20 日/年、雷撃頻度は2~3 回/年 \cdot km² とされている場所である。

3.2 CIGRE 式カウンタ

最近ではトランジスタを用いた改良形が使用されている所もあるが、ここでは冷陰極放電管を用いたCIGRE で統一された方式のものを使用し、感度設定は10 V/m とした。図4より2 kA および65 kA を計測する最大距離は8.6 km および26.4 km である。5 V/m とすると感度は高くなり、遠距離の目視観測が困難となり雷鳴に対しても判別しにくくなる。一般に5 V/m で代表される半径は20 km であるので10 V/m のときの半径は16 km と考えれば良く、面積比は0.64 となる。

雷放電による電界の強さが10 V/m 以上のときカウンタは動作するが、電磁カウンタと同時に雨量計などに用いられる自記電接計数器を働かせて時間と計数の対応がつくようにしてある。また信号が連続的に入力されても、放電管固有の不感時間(約2.5 秒)があるのでその

間は動作しない。これらのことは 3.3, 3.4 で述べる 2 種類のカウンタにも共通の事柄である。

3.3 Malan 式カウンタ

2.2 で述べた雲間放電を分離する目的で図 6 のブロック図で示すような回路を用いて実測を行った。アンテナでとらえた電界変化の放射成分を 5 kHz および 100 kHz で同調させ、両者を反対極性となるように整流しておく。雲間放電のときの波形と大きさを等しくなるように調整しておけば、このときは Comparator により出力は出ない。対地放電のときは 5 kHz 成分は雲間放電の 10 ~ 20 倍あるので、出力は出るが、この場合もキャパシ

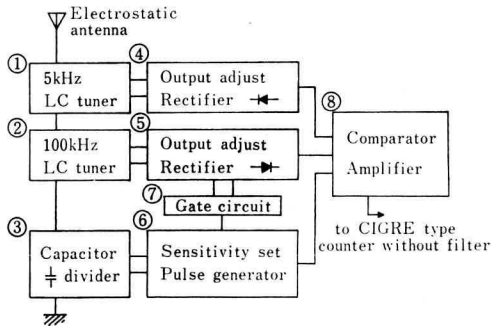


Fig. 6 Model diagram of Malan type counter.

タ分圧により同図の⑧に加わる静電界成分の電圧を検出して感度調整を行うと同時に、⑥の信号で⑦のゲートを開き⑥の出力が出るようにしてあるので、アンテナの誘起電圧が低い場合は動作しない。⑧の出力はフィルタ部分を除いた CIGRE 式カウンタに加えて、2.2 と同様に自記記録を行う。

このカウンタは前述のように 5 kHz 成分を検出するので、同一の対地放電に対し CIGRE 式よりも誘起電圧

は低く、図 4 の点線で示した特性となる。5 V/m に対しては、平均的電流での動作距離が 17.2 km となり CIGRE 式に比べて約 15 % 短い。

3.4 垂直アンテナ用カウンタ

3.1 で述べた垂直アンテナに、試作したトランジスタ式カウンタ (以下 VA カウンタという) を接続して実測を行った。このカウンタの構成は CIGRE 式カウンタと同様に 500 Hz 付近を通過させるフィルタ、感度調整部、不感時間調整をかねた FET を用いた単安定マルチバイブレータおよび出力増幅部からなる。アンテナの対地静電容量と実効高から、5 V/m の電界変化ではアンテナ誘起電圧は 11.8 V となり、カウンタ入力電圧は 1.35 V となる。今回の実測では、アンテナ誘起電圧が 14 V で動作するように設定してあるので、電界変化としては 5.93 V/m 以上ならば動作する。

4. 実測結果と考察

第 2 表に 1976 年 5 月からカウンタが動作した日別の 3 種類のカウンタによる計数値を示した。図 7 は CIGRE 式と Malan 式との共通実測期間中で、特にカウント数の多かった 5 月 17 日分、6 月 22 日分および 7 月 19 日分の測定での時間経過とカウント数の関係を示した。図 8 は CIGRE 式と VA 式について、8 月 10 日分と 9 月 9 日分のデータを示したものである。

4.1 カウンタの動作範囲と雷放電度数

Malan 式カウンタの動作感度設定は 5 月の取付時より 7 月 13 日までは図 4 の (m_1) 線、以後 7 月 26 日までは (m_2) 線としておいた。これらの線と図中の点線との交点から、雷撃電流代表値で考えると CIGRE 式の有効動作半径 16 km に対して、(m_1) では 18 km、(m_2) では 16 km であるから 7 月 13 日以前は Malan 式の方が約

Table 2 Counted number of lightning flash counter.

Date	counter type			Date	counter type		
	Malan	CIGRE	VA		Malan	CIGRE	VA
○May 7	—	50	—	Aug. 10	2	73	75
May 9	4	6	—	Aug. 24	0	11	25
○May 17	40	235	—	Aug. 28	0	6	19
Jun. 15	0	10	—	Sep. 8	—	7	8
○Jun. 22	16	13	—	○Sep. 9	—	30	35
○Jul. 19	22	106	—	Sep. 11	—	18	15
Aug. 3	0	10	28	○Oct. 5	—	32	—

(○ : The day when thunder was heard)

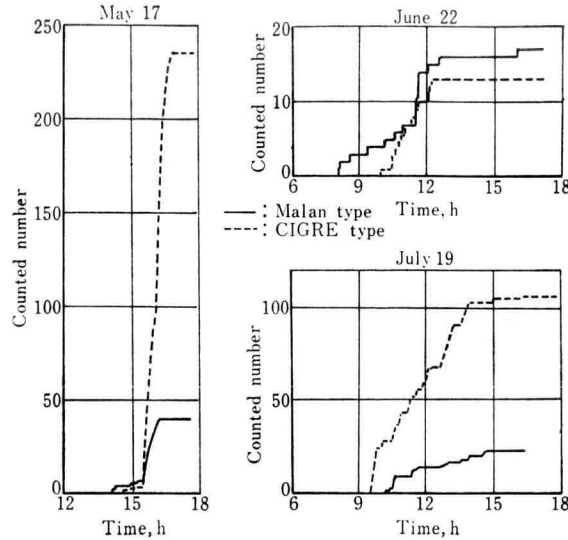


Fig. 7 Comparison of counted number with Malan and CIGRE type counter.

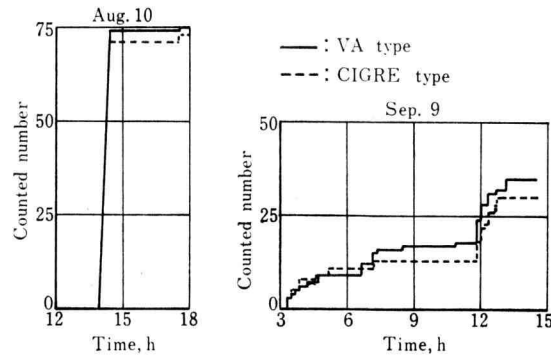


Fig. 8 Comparison of counted number with VA type and CIGRE type counter.

2 km 遠くまで動作することがわかる。両カウンタの単位面積当りのカウント数とその比を第3表に示す。この比を見ると日によって大きく変っているが、これはその日の雷の状況（雲間放電が多いか、落雷が多いか）によるものと思われる。6月22日は比が1になっているがこれは検討を要する。他の2日のデータからみると雲間と対地の比は 10:1~10:2 程度となる。後述するように5月17日は雷雲が観測点の頭上近くを通過したと考えられ、6月22日は遠方を通過した場合である。

つぎに、VA 式と CIGRE 式の結果についてである

Table 3 Number of flashes per km² counted with CIGRE type and Malan type counter respectively and their ratio.

Date	Malan	CIGRE	Ratio
May 17	0.039	0.292	0.13
Jun. 22	0.016	0.016	1.00
Jul. 19	0.027	0.132	0.21

が、カウンタの特性は類似しているの、垂直アンテナと水平アンテナの比較といえる。共通期間である8月3日から9月11日までのカウント数の和は、VA式が205回、CIGRE式が155回である。感度の設定から有効動作半径はVA式が19km、CIGRE式が16kmと考えられるので、共通期間での単位面積当りのカウント数はそれぞれ0.18と0.19 [回/7日・km²]となりかなり良く一致している。したがって、日によって動作数に若干の違いはあるが、垂直アンテナは水平アンテナの代りとして使用できると考えられる。

IKLとカウント数に関しては、第2表のうち雷鳴の聞いた日が6日あり、これらの日のCIGRE式のカウント数の合計は466回である。文献(5)によると雷雨日数Tとカウント数Kの関係は次の回帰方程式で近似される。

$$K = 84.3T^{1.185} \quad (10)$$

ここで、T=6を代入するとK=705となり、これに面積比0.64を乗ずると451回となり良く一致する。

4.2 実測時の雷の活動状況との対応

図7、図8に示す時間経過に対するカウント数の関係を、観測場所付近の雷の活動状況とともにやや詳細に検討する。

[5月17日]

前々日までの6日間は晴天が続き、前日は曇のち小雨となる。当日は朝から薄曇であったが、15時頃には北の空が暗く雨雲でおおわれる。15時35分最初の雷鳴を聞く。同36分約3.5km地点、同41分北西方向数百メートル付近に落雷があり、同時に2本の放電路が観測された。このころより強い雨が降りはじめ、同45分~50分の5分間は特に強い西風が吹き激しい雨が降ったが以後小雨となり、16時20分には雨もやみ夕方には晴となった。落雷は15時47分に北の方向近地点であり、同56分~16時10分には南東方向に落雷があった。最後に雷鳴を聞いたのは16時10分である。

また本学観測場所より北西約25kmの付近では14時すぎに10~20分間激しいヒョウが降り、南東7km付近でも16時頃にヒョウが降った。

当日の観測結果から雷雲の移動速度は約17km/hと考えられる。CIGRE式の記録結果は14時30分から同50分までに3回で、あとの232回は15時35分から16時45分の約70分間に動作している。一方、Malan式の記録は14時以前に4回、15時から16時30分に36回動作している。

[6月15日]

関東地方一帯に雷が発生したようであるが雷鳴は聞えなかった。17時35分より小雨が降ったが、CIGRE式のみ18時30分~22時の間に10回カウントしている。これは雲間放電によって動作したものと考えられる。

[6月22日]

10時30分頃から雷鳴が聞えたが近地点ではない。Malan式は8時30分から12時30分のうち、特に11時30分頃に動作したものが多し。CIGRE式は10時から12時までの間に動作した。この日と5月17日の分はMalan式の方が30分~2時間も早くから動作している。動作半径はMalan式の方が大きく、検出している周波数成分が違うとはいえ2時間も早いということは異常であり、Malan式の不整かCIGRE式の感度低下が考えられる。

[7月19日]

Malan式は10時から14時45分までで、特に10時15分から同25分の間で6回動作した。CIGRE式は106回中、9時40分~14時で103回カウントした。当日は10時15分~同25分頃には約4km、11時37分には1km以内、その後12時43分~同48分、13時8分、14時38分、同43分頃に落雷を確認している。しかし、データによると14時43分と同48分の落雷に対してCIGRE式は動作していない。

[8月10日]

CIGRE式は14時頃71回、VA式も同時刻に74回と良く一致している。当日は両カウンタとも動作したが雷鳴は聞えず、Malan式カウンタはこの時刻には動作しなかった。Malan式の2回は10時頃のものでカウンタの不整と考えられる。

[9月9日]

前日の夜中から台風17号の影響で風雨が強い。CIGRE式は3時20分から5時30分で11回、VA式は9回、また正午頃にはCIGRE式で17回、VA式で18回を記録した。未明の分は南東10km付近に落雷のあったことが確認され、正午頃の分は雷鳴は聞えたが閃光は確認されなかった。

以上、動作範囲と、実測場所付近での当時の状況を述べたが、Malan式は不整動作をすることがあり今後原因を究明する必要がある。VA式はCIGRE式と大体一致することがわかったが、9月9日のデータでわかるように個々の動作において不一致が認められる。

5. む す び

雷放電カウンタによる実測結果と簡易モデルにより計

算した動作範囲とから検討を加え、問題点をあげたが、今後の研究に待つべきものも多い。得られた結果の主なものをまとめると次のとおりである。

(1) CIGRE 式カウンタは落雷ばかりでなく、雲間放電によっても動作する。

(2) Malan 式カウンタは雷雲の強弱や通過位置により異った動作をすることがあるので、目視観測とあわせてその動作範囲や、落雷のみによって確実に動作するかどうか等今後更に検討を要する。

(3) CIGRE 式と VA 式では全体的にみるとかなり良く一致したカウント数を示しているので、設置面積の小さい垂直アンテナを使用する方が実用的である。

(4) CIGRE 式のカウント数は雷鳴の聞えた日に限って言えば、IKL との相関回帰直線と良く一致する。

前にも述べたように、この2年間は例年よりも雷の発生数が少なく、得られたデータもわずかであるので、信頼性のあるデータを得るために今後も継続して実測を行い、問題点を解明していく必要がある。

おわりに、終始御指導を賜った本学電気工学科科長中野義映博士、大日本電線株式会社木下勝弘博士に深く謝意を表します。また実測に御協力頂いた関係各位に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) UMAN, M. A. : Lightning. McGraw-Hill, 1969, p. 127
- 2) 木谷 : 電力施設の雷害防止とその設計, 電気書院, 昭 40, p. 10
- 3) 耐雷設計基準委員会 : 送電線耐雷設計基準要綱, 電研・技研報告, No. 71037, 1971. 9, p. 3
- 4) 木下, 山森, 高木 : 雷放電カウンタによる雷放電度数の実測, 電試彙, 33, 9 号, 昭 44. 9, p. 105~125
- 5) 耐雷設計基準委員会 : 送電線耐雷設計ガイドブック, 電研・技研報告, No. 175031, 昭 51. 3, p. 20
- 6) ANDERSON, R. B., VAN NIEKERK, H. R., GERTENBACH, J. J. : Improved lightning-earth flash counter, Electronics letters, 9, 17, 1973, p. 394~395
- 7) 河村, 北條, 三村, 岩泉 : 昭 51 電気学会全国大会, No. 942, p. 1229
- 8) 1) と同じ, p. 4
- 9) 同上, p. 96~109
- 10) PRENTICE, S. A., MACKERRAS, D. : Recording range of a lightning-flash counter. PIEE, 116, 2, 1969, p. 294~302