

雷と送電線

藤 高 周 平

カットは普通カメラによる多重雷の寫眞

今年もまた雷の季節となつた。夕立とともにわたしたちに涼風をおくる雷も、送電線に落雷しては大都市も一瞬のうちに暗黒の巷に化するいたずらものである。とくに現有施設の全能力をあげて送電しているわが國の現状ではその対策はもつともいそがれている。送電線に架空地線ををはることは電撃豫防に有効な方法だが、確念ながら完全とはいえない。そこでもし被害をうけた地點がただちに判定されれば、修理に要する人手と日数をきわめて節約できるであろう。これには有望な方法がある。ここにこれらに關して筆者の行つた最近の研究を紹介しよう。

1. 雷の季節

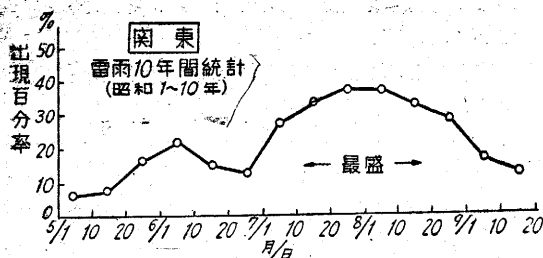
青空にむくむくと浮きだしてくる入道雲、雷の期待される時節となつた。10,000米以上にもび上る入道雲は、熱的に發生する上昇氣流の象徴で、この種の雷雲による雷を熱雷という。熱雷のほかには不連続性にもなる界雷もあるが一年間を通じてもつとも多いものは、この熱雷性のものである。

したがつて、わが國では7月と8月が雷の最盛期である。第1, 2, 3 圖は出現の統計を示す。第1圖は中央氣象臺による關東地方の10年間の統計である。旬日平均統計といつて、10日づゝに區切つてその期間中に雷の出

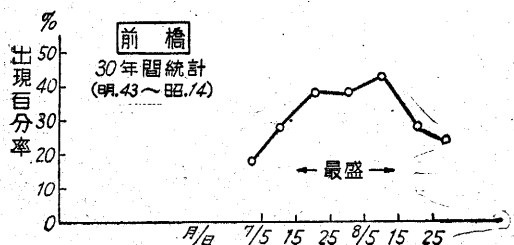
カメラを振動しつつ撮影したもの、分岐と屈曲の多い美しい電光（日立研究所撮影）

現した日数とその間の日数との割合で、出現百分率をとつてある。この統計では6月上旬、いわゆる梅雨あけごろにも相當な出現があることを示している。この部分は同じ日本中でも地方的にいくらか差異があり、關西地方の統計では6月上旬の山は、關東程顯著ではない。

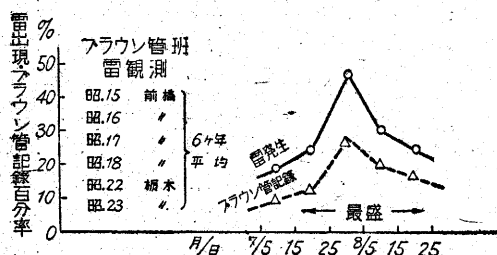
しかし7月8月にとくに多いことは全國的である。關東地方では、その北部から西北部にかけて雷の發生が多い。日光の連山、赤城、榛名、少し西へ廻つた秩父連峰が、關東での雷の巢である。第2圖は前橋測候所での



第1圖



第2圖



第3圖

30年にわたる統計結果である。これでも第1圖と同様7月中旬から8月中旬にかけてが、雷の最盛期である。

このように関東北西部で発生した雷はどの方向に移動するか。この点では、もとの日本學術振興會雷災防止委員會で、氣象關係班が數月にわたつて調査した。その結果は、非常に明確な結論となり、ほとんど大多數、約90%の雷は大體東南にむかうことが明かにされた。もちろん小地域的には曲折をくりかえし、中にはぐるりと一まわりしておなじ町に2度もやつてきた面白い例もあるが、廣い地圖のうえで互視的に見ると、大體西部で発生して東南に進むものが大多數というわけである。

強さも多くは次第に弱り、関東地方では海上まで強いまま移動することはなさそうで、この點千葉縣は関東地方の中で、もつとも雷に恵まれぬ(?)地域ということになる。

第3圖は昭和15年以降、前記學術委員會その他で、著者の擔當した觀測記録の統計である。氣象關係の統計はいわゆる雷雨出現日數で、電氣技術者として問題にするのは落雷性の雷であり、雲間放電にすぎないような雷はまづ問題外なのである。この意味で、比較的強い雷を對象とした觀測、記録の統計が第3圖である。實測從事

期間も短く、統計的強みは低いが、この結果からみると最盛の時期は、第1、2圖の氣象學的統計と一致しているといえる。

2. 送電線の雷事故

送電線路は電力輸送の大動脈であり、生産動力に對する根幹でもある。

配電線路の雷による事故も相當數(例えばある一年間の配電線路事故中、雷によるものが20%)があるが、大電力の送電線ではさらに雷事故の比率が大きい。送電線中でも6萬、7萬ボルト級の送電線の場合より、14萬ボルトの主要幹線の方が、雷事故の占める比率が大きくなる。このことは電壓が高いものは、當然線路絶縁が丈夫で、ピン端子のような弱體線路を含まないことにもとづいて、鳥害その他の雷以外の事故数は減少するのに他面電力施設にたいする雷という宿命的問題の方はつねに追隨してくる結果である。

國內の送電系統は、現在14萬ボルトが最高電壓であるが、この主要線路に對する9年間の日本發送電の統計では、線路事故總數867件中579件、實に67%が雷による事故である。

主要送電線の事故は、末端配電線の事故とことなりたんに一送電線路でも影響するところが大きい。わが國の近年の状態では、不十分な送電線路は一杯に電力を送りこんでいる。電力だけが戦後の向上生産であり、しかもその大部分が水力電氣で、長い送電線ではほとんど現有施設の全能力をあげて輸送している形である。このような状態では、主要幹線の一點の事故が、その線路を遮斷したために、連繫全系統の安定を崩すことにもなりやすい。このように一つの動脈の疵から、廣範圍にわたる大都市停電という大出血にいたつた例もある。

送電線の雷事故を防止する、有效な手段は線路上に接地線を張り、これを鐵塔で確實に接地することである。これで雷の直撃をうけ止めようというわけで、1本より2本の方がなお効果的である。

うえに接地線がないと、電線が直撃にさらされ、3本線の3相1回線でも、6本線の2回線でも上位におかれた上線が最も雷撃を受けやすい。第1表はこの關係を碍子事故から明かにした結果の例(數年間の統計)である。

第1表 地線なしの140 kV 送電線に
おける碍子事故統計

	上線	中線	下線	上線事故率
茨城線(1回線)	23	—	黑相3 白相2	82%
黒部幹線 (2回線豊岡以南)	29	11	2	70%

第1表の統計で、70%、80%が上線であることは、こ

の上に架空地線を張れば、雷直撃を遮蔽するのにいかに有効かということ物語るばかりでなく、第2に鐵塔への直撃が比較的少なく徑間が襲われることが大きいらしいという重要な意義をもつ。線路中では鐵塔が上へてつばつて、導體は大きなカタナリ曲線をえがいて垂下しているのにやはり、導體部分が多く雷撃をうけるらしいということである。

この推論の根據は、もし鐵塔に落雷すれば、雷電流と鐵塔の接地抵抗とによる、鐵塔電位上昇にもとづいて引きつづき鐵塔から電線路に閃絡するという、いわゆる逆閃絡の機会が多くなり、このような閃絡のときは上、中、下線に差別はそれほどみとめられないはずである。したがって第1表の數値から推論するとあまり逆閃絡をふくまず、導體直撃が多いということになる。

事實架空地線を設けた線路では、上線事故と下線事故との間に第1表ほどの差はない。第2表はその一例として、同じく黒部幹線の他の地區での統計結果を示す。

第2表 地線1本の140 kV 送電線導子事故分布の例

	上線	中線	下線	上線事故率
黒部幹線 (2回線鉄父附近)	17	12	11	42%

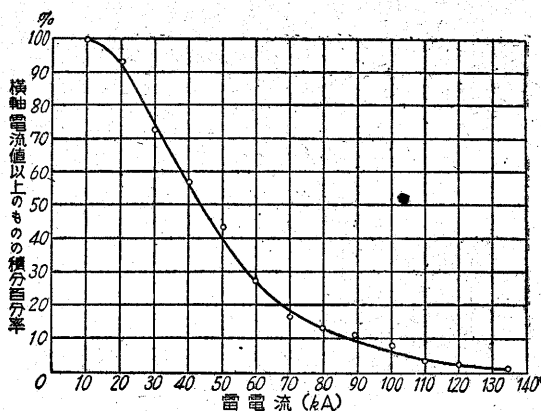
第2表で、架空地線があつてもいぐらかは上線が多いことから、1本の地線では遮蔽効果が不充分とも考えられるが、なんとしても、地線に落雷したものが鐵塔に到達してそこで逆閃絡を生じたものが多いことがみうけられる。

もつとも逆閃絡には長徑間の場合、徑間逆閃絡という現象もある。すなわち徑間で、地線に落ちた雷で瞬間的にその部分の地線電位が奔騰するわけで、その電壓波が鐵塔まで傳播し鐵塔で大地に逃げ道があつたことをみつけて、その効果が雷撃點の電位奔騰を抑制するまでには、鐵塔までの導體長さを光の速度で往復するだけの時間を必要とする。この時間内に地線から電線へ閃絡する電壓値まで、地線のうけた雷電壓が急に上昇すると、徑間で逆閃絡を生ずることになる。この閃絡では、當然の結果として線配置の関係からは上線の襲われる率は多く、第2表の數値にはこれも含むということも考えられる。

逆閃絡現象の究明には、地線や鐵塔にとりつけた磁鋼片による記録が大いに役立つ。磁鋼片というのは磁鋼薄板を重ねた小さい棒状のもので、雷電流の磁界中におかれると數 μs 以上の繼續時間の電流で磁化されることにより、その殘留磁氣から雷電流波高値を知りうるという有効で簡単な道具である。この磁鋼片による送電線路での測定は、電氣試験所、東京芝浦電氣その他の協力をえて、發送電雷害防止委員會で多年繼續し、すでに相當有意義な統計をえて、逆閃絡現象の究明に役立つた

がなお實地対策の基礎資料を確立するよう實測をつづけている。

第4圖はいままでにえられた雷電流値の統計を示す。



第4圖

縦軸は果計百分率で、例えば5萬アンペア以上の記録は約40%であることを示す。まゝにのべたように架空地線によつて有効に保護する鐵塔逆閃絡防止が重要で、この問題は雷電流の大きさと鐵塔接地抵抗が決定要素であり第2圖の統計がその基本となる。例えば鐵塔で逆閃絡を80%まで防止しようとするすると7萬アンペア程度の雷電流までもち耐えることが必要で、鐵塔の接地抵抗値(衝擊値)は7萬アンペアに対する鐵塔電位上昇が、碍子の閃絡電壓値以下におさまるほど低くすることが必要になる。例えば14萬ボルト線路で、碍子閃絡電壓が100萬ボルトの場合、鐵塔は衝擊大電流に対する抵抗値(交流測定値より低下する)が14オーム以下でなくてはならないことが結論される。

磁鋼片測定の結果の一つとして、落雷電流の極性がほとんど全部負(大地から雲に向つて電流が流れる)であることも統計的に明かにされた。すなわち110回の直撃記録中正のものはわずか2回であつた。

3. 雷電壓の觀測と事故點の判定

すべて、対策をたてるには、統計的考察と現象の把握が基礎となる。雷電壓の觀測については、とくに前記學振雷災防止委員會が、その主要研究の一つとして力を注いだ。(1) 戦時中は委員會の仕事もほとんど停止されたが、終戦後日本發送電が主體となり、送電線の雷電壓の觀測を進めており、それぞれ相當な成果をえてい

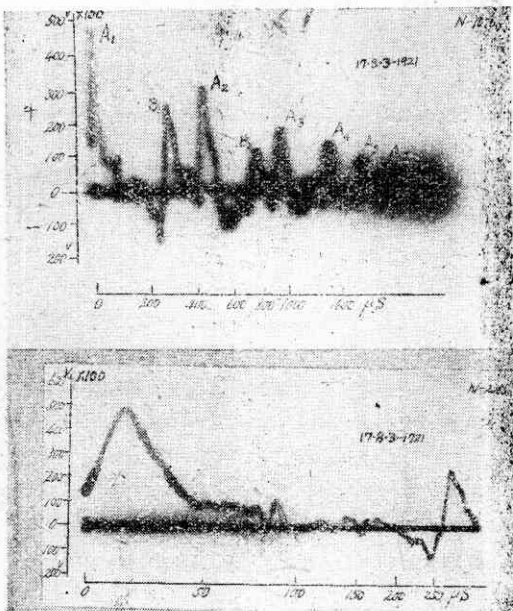
雷電壓の觀測用として、學振の委員會設立當初に、高速度ブラウン管オシログラフを工夫した。現在瞬時過渡現象記録用、あるいは衝擊電壓試験用としてわが國で廣く利用されている高速度ブラウン管オシログラフは、この學振型ともいふべきものにほかならない。

裝置の説明と、二三の撮影例は、本誌創刊號(2)、その他(3)を参照されたい。こゝでは、著者の蓄積した雷電壓

オシログラムの中から、落雷地點と関連をもつ點で興味のある二、三の例をひろいだしてのべよう。

どんな波形の電圧が線路に現われ、また線路を傳播して發變電所の脅威となるかは、大きな基礎的問題で、現在なお充分解明されているとはいいがたい。しかし實地面で要望される手近な一つの問題としては、線路中のどの鐵塔で落雷し閃絡がおこったかを知りたいことである。

第5圖は、6萬ボルト送電線で觀測した雷電壓の例である。上圖、下圖ともに同一雷で、2臺の高速度プラウ



第5圖

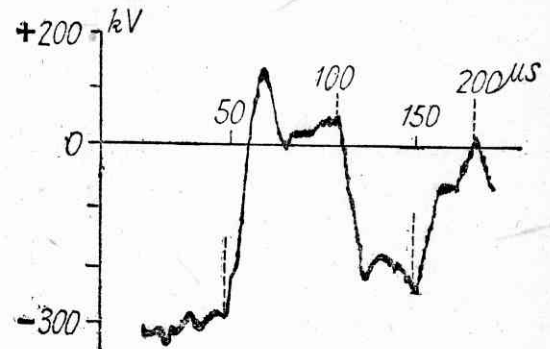
ン管オシログラフで掃引速度を変えて記録した。下圖のものが最初の約300マイクロ秒の部分時間を引伸ばした形に記録されている。上圖の長い時間の記録で面白いことは A_1, A_2, A_3, \dots のように明かに等間隔と認められる電壓波がくりかえし到来している。これは昭和17年すなわち8年前の記録で、そのころから電壓波の線路往復反射に注目することによつて、閃絡點までの距離を算定しうる見込みをえた。架空線路では電壓波はほぼ光速で傳播し、最初に觀測點に到来した波が、觀測點で反射する状態にあると、さらに事故點の方に反射してもどつてゆく。そこで事故點が電弧地絡中だと逆反射してふたたび觀測點に到達する。したがつて2度目にオシログラム上に到来するまでの時間が、閃絡點までの一往復時間に相當する。第5圖のオシログラムをえた野中開閉所では數多くの雷電壓記録をえたが、反射時間の解析にはあまり好都合でないことが結論された。それはここが多數の線路の集合離散する開閉所で、多方面の雷電壓の記録をうるのには有利であるが、同所での反射状態が好ましくないためである。

その後この閃絡點判定に注意して有意義な記録をうる

ようになつたが、口繪第3圖のオシログラムは、昭和23年7月26日16時31分茨城變電所におけるまことに有意義な記録である。14萬ボルト茨城線送電線で直撃雷を捕え、しかも上記の往復反射をもつとも明確に記録した例である。茨城變電所は同線路の末端で反射條件がよい。第6圖はこのオシログラムの寫しで、圖中に點線で記入した通り、約50マイクロ秒毎に明確な反射波が到来している。

一往復50マイクロ秒を基として、光速傳播を考えると7.5キロメートルの距離にあたる。後日線路巡回者によつて、178號鐵塔の碍子破損が発見された。同鐵塔までの距離は、7440メートルで上記の判定とよく一致した。

第6圖は30萬ボルトを超過する、かなり大きな直撃



第6圖

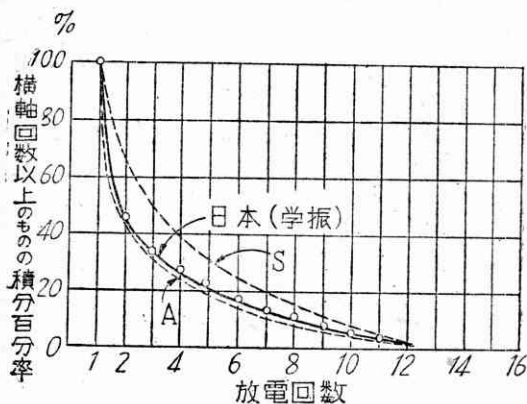
雷の記録である。線路以外に落雷した場合のいわゆる誘導雷電壓の記録は數多くあるが、直撃雷の記録は少い。誘導雷電壓は比較的低く電壓の高い送電線ではほとんど問題にならないものが多い。誘導雷記録中で面白い例として觀測地點からわずかに數百メートル離れた農家に落雷したときの誘導雷記録がある。口繪第2圖はこのときの被害農家である。(4) (栃木縣方岡昭和22年7月25日午後5時56分)。猫苗代舊幹線の線路から300メートルばかりはなれた一軒家である。このとき觀測所を設けた片岡開閉所で記録した誘導電壓値は12萬ボルト程度であつた。舊幹線は2本の地線を設けた、遮蔽のよい線路のせいでもあるが、14萬ボルトの線路電壓に對しほとんど問題にならない。

4. 雷放電の性質

電氣機器の防護上重要な事柄に、多重雷の問題がある。肉眼で一つと觀察される電光が、ある時間間隔を置いて何回かの放電が同一の通路を通つている場合が相當ある。これを多重雷というが、避雷裝置に對しては雷電壓がくりかえし到来するわけで手痛い問題である。多重雷の分析には回轉レンズあるいは回轉カメラを裝置したい。いわゆる低速ボイス・カメラが使用される。口繪第1圖はこの撮影例、(昭和17年7月11日19時36分、前欄

市郊外) 前記學振委員會で觀測したうちで放電回数のもつとも多い記録である。中央が静止寫眞, 1秒弱の一周速度で回轉するレンズで撮影された周圍の像で, 11本の放電がみとめられる。

第7圖は多重度の統計で, わが國での統計を實線で示



第7圖

す。縦軸は累計数の百分率で約45%が2重以上の多重雷なることを意味する。點線は外國でえられた統計で, 米國 Mc Eachron の統計がA曲線で, 學振の結果によく一致している。Sは少しちがうが, ソ聯の報告である。Schonland の統計もこのSに近い。このようにいくらかの相異はあるが, 雷放電の約半数が2重雷以上ということになる。

多重雷の全完了時間は0.1秒程度から1秒以上にもおよぶ。したがってごく低い速度の回轉カメラで分析できる。カットは普通のカメラで, たくみに左右にふり動かしつゝ撮影された美しい電光の例で, 2回の強い主放電がみられる。

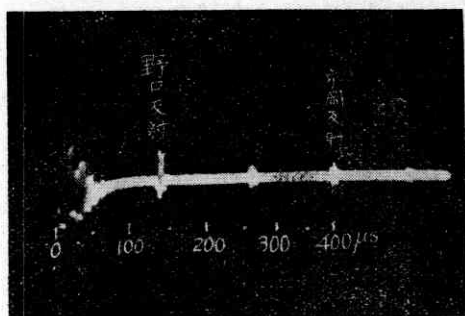
5. 閃絡點標定器

雷撃をうけて閃絡を生じ, 交流電弧電流が繼續すると線路導子が破損する。このような事故導子があつても, 強行送電の可能な場合が多いが, なるべく早く破損導子を置換しないと, そこが弱點となり事故を繰り返しやすい。二, 三百キロにおよぶ長い送電線を巡回點檢する仕事, 線路保守者の大仕事である。山の上の鐵塔などはなおさらである。最近米國では送電線路の點檢にヘリコプターが活躍しているとのこと, うらやましい次第である。

まえにのべたように閃絡發生の瞬間に地絡事故發生地點を判定することが要望され, 著者の研究室では昭和24年閃絡點標定器を試作した。米國でも最近1, 2年さかんに檢討されつゝある様子である。口繪第4圖は試作品の寫眞, 本文第8圖は14萬ボルト送電線における茨城變電所での現場試驗結果の一例である。方式のくわしい説明は他の報告⁽⁵⁾を参照していただきたいが, いわゆるレーダー方式とよばれるものの一つで, 事故發生

の瞬間, 測定器から, 1,000ボルト程度のインパルスを線路へ發射し, それが閃絡點で反射して歸つてくるまでの時間をブラウン管で測定する。

第8圖の記録は60キロメートルの送電線の途中で人



第8圖

工的に地絡を作つて試験した結果で, 約130マイクロ秒のところで地絡地點野口からの反射が到來している。第2回目の反射も約260マイクロ秒のところに現れており, 第3回目の反射は線路末端片岡からの反射と丁度重り合っている。横軸起點の位置に發射波があるが, この場合はとくに計器用變成器(接地用)の低壓側から測定インパルスを送りこむことを工夫したので, かなり亂れた振動波形になつてゐる。活きた線路に標定器を接續する方法が一寸やつかない問題で, 結合用の蓄電器を省略する方法として試みた一工夫である。

標定器を實際の送電線の雷事故の判定に用いることを今年の雷雨期にはぜひ成功させたいとねがつている。幸い日本發送電關係諸氏の積極的な協力もあり, 主要メーカーも同じ意氣込みで鋭意準備中である。

おわりに, 本文の基礎資料を頂いた日本發送電株式會社とくに線路關係諸氏, ならびに文中記載の日本學術振興會, 九特雷災防止委員會, 發送電雷害防止委員會の諸氏に謝意を表する。

× × ×

送電線路はたびたび雷に襲われる。ところが電線や線路の鐵塔に雷の落ちた實景寫眞が一枚もない。落雷とともに逆閃絡を生じている實景でもあれば, 工學的にも意義が大きい。

この題目をかかげて筆をとりはじめ, このような寫眞がほしいという慾望がおこつたのではない, その實景をみたいことは, 筆者のみならず, 關係研究者, 技術者の年來の希望なのである。讀者中に心當りの方, あるいは將來にでもこのような寫眞を入手されたら, ぜひ御連絡下さることを切におねがいしたい。

文 献

- (1) 學振雷災防止特別委員會: 雷の研究(目下印刷中)電氣會社發行
- (2) 生産研究: 昭24-10月創刊号, 表紙及びオフセット1頁。
- (3) 藤高: 電氣學會專門講習會豫稿(昭24-11)高速度ブラウン管オシログラフ。
- (4) 建築物, 人畜に關する避雷の參考パンフレット, 學振第9特別委員會第2分科會: 避雷心得と避雷針, (電氣會社)
- (5) 藤高, 藤井, 藤主: オーム, 昭24-11月, 738頁。