

雷 放 電

高 木 増 美

I. 電 光 の 構 造

目には1本に見える電光も、回転写真機を使つてしらべてみると何本かの閃光が同じ路をある時間間隔をおいて数回繰返しているものがあることが分る。全電光の中約半数がこの様な多重閃光を有しているが、3回繰返すものが多い。更にこの一本一本の閃光が二重の構造をもつていて、雲から下降してくる光の弱い先駆 (leader) と、それが大地に達する直前に始つて逆に同じ路を大地から雲に向つて上昇する光の強い帰閃 (return) から成るのである。

この帰閃の方はどの閃光でも大体一様な性質をもつているが、先駆は1番目の閃光の時だけは全く違った形で、階段先駆 (stepped leader) とよばれる様に階段状に進行を断続するのである。即ち雲からある距離放電が進むとそこで進行が止つてしまう。ある時間をおいて雲から第2の放電がおこつて前の放電よりも少し先まで進んで止る。更に又ある時間をおいて第3の放電がおこるといふ具合に、幾つかの放電が、ある時間間隔をおきながら雲から繰返し出発し、順々に少しずつ先の方に進むのである。これらの放電は新しく進む先の部分だけ強く光る。だから一つ一つの階段をつくるストリーマー (糸状に伸出して行く放電) 自身は非常に高速であつても、全体としてみた先駆の先端の持つ有効な速度はこれに比較してはるかにおそいものになつてしまう。この点については、写真にとることはできないが、このおそい様な有効速度で進む連続的なパイロットストリーマー (pilot streamer) という弱い放電があつて、これが階段をつくる速かなストリーマーに先行しているものと考えられている。つまり階段ストリーマーはパイロットストリーマーに追付くまでしか進行できないというわけである。

以上の様な性質を有する階段先駆に対して、第2閃光以下の先駆は殆んど一定の高速度で下降するので、箭形先駆 (dart leader) とよばれている。

電光の枝分れは階段先駆の際に既に作られていて必ず下向きである。帰閃は大地から上昇して来て、幹を

そのまま雲に向つて上昇すると同時に枝の先端に向つても分れて進み、先駆に追付いてから止る。

帰閃が雲に達した後も尙弱いながらかなりの時間残光が放電路に沿つて残る。この残光の間にも時々やや明るく輝く瞬間のあることがある。

帰閃は先駆が大地に達する直前に始る様で先駆とは地上約5m位の所で出あう。この位置は落雷点が高く突出しているほど多少高くなるものと考えられる。特に高い建造物への雷の場合は上述した様な普通の雷とは大分異なる構造をもつものが見られる。即ちエンパイヤステートビルディングへの落雷では雷の約1/4は上述した普通の構造をもつていたが、他の3/4は第1閃光の先駆が逆に建物の頂上から始つて雲に向つて上昇するのである。このときの枝分れは上向きにおこる。この先駆も階段状に進行を断続する。更にこの場合は先駆が雲に達しても雲の方からの帰閃がなくて、ただ残光が非常に長いので連続閃光といわれている。しかしこの後の第2閃光以下では別に変つた点はなく、箭形先駆が雲から下降してくるのである。

電光の以上の様な経過の種々の数値を第1表に示しておく。又第1図Aは普通の電光の構造を図示した

第1表

| | 速度 (cm/sec) | 継続時間 (sec) | 備 考 |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|--|
| 下降階段先駆 パイロットストリーマー 階段ストリーマー | 2×10^7 $> 5 \times 10^9$ | 10^{-2} | 階段の時間間隔 階段の長さ 50 μ s 40 m |
| 下降箭形先駆 | 2×10^8 | 10^{-3} | |
| 上昇帰閃 | 5×10^9 | 4×10^{-5} | |
| 残光時間 | | 10^{-3} | |
| 各閃光間隔 | | 3×10^{-2} | |
| 上昇階段先駆 | 3×10^7 | | 階段の時間間隔 階段の長さ 30 μ s 8 m |
| 連続閃光 | | 4×10^{-1} | |

もので、簡単のために電光が鉛直な路に沿つておこつた時、水平に移動するフィルム上に撮影される写真像の形状をあらわしている。

II. 電光の放電物理的解釈

雷雲内の電荷分布は、下部の所々上昇気流の激しいと思われる所に正電荷部分があるが、大部分は下部が負で、上部が正に帯電している。

電光は大抵の場合、この雲の下部の負電荷が大地に下つて中和する過程で、雲を陰極、大地を陽極としておこる放電である。このことはエンパイア ステートの場合でも同じことで、先駆の進行方向が逆になるのは極性のためではなくて、電界が尖端で特に強くなるためである。室内の実験でも、平板と尖点とを両極とする放電では極性に関係なく尖点から始るし、両方とも尖点にすれば、両極から放電を同時に開始させることもできる。そしてこの際の枝分れは必ずその進行方向におこるのである。

雲から始るパイロット ストリーマーは電子の“なだれ”だと考えられる。大気中で火花が開始するのは、よく知られている様に 30 kV/cm の電界が必要であるが、飛行機による実際の雷雲中の観測では正負とも最高 $3\sim 4 \text{ kV/cm}$ に過ぎなかつた。しかし、この値は必ずしも瞬間的な電界が測られているものとは限らないから、空気の乱流などの結果、突発的に局部に 10 kV/cm 程度以上の値に達し、水滴の存在と相俟つて電子の“なだれ”のつくるストリーマーの芽が出来上がるが、一度出来上つたこの芽については雲と大地との間に 3 kV/cm 程度以上の電界があれば、ストリーマーは引続いて発達して行くことができると考えられている。

ストリーマーは空気を電離しながら伸びて行くが、雲に近い後方では再結合によつてイオン密度は減少して行く。この結果伝導度が悪くなり、ストリーマーが伸びて行くのに必要な電流を雲から運ぶときの電圧降下が 30 kV/cm 以上になつて、新しく階段ストリーマーが始る。再結合の考えからは、この値に達するまでの時間は初めのイオン密度がある程度以上大きければ、その大小に拘らず大体一定の $50 \mu\text{s}$ になるのである。これが階段状の先駆をつくる理由だと考えられる。この階段ストリーマーは、既にパイロットによつて作られたイオンが、まだ相当数残っている路を進むので高速度で進行することができる。即ち電子自身の進む速度は、その場の電界の強さで決つてしまうが、ストリーマーの前進はその路に前以て存在し、ストリーマーの先端の強い電界内に含まれる自由電子全体

によつてきまつてくるので、この電子密度が大きい程早く進むことができるのである。しかしパイロット ストリーマーに追付いてしまえばもはやその先には多量の自由電子が存在しないので、高速に進むことは出来なくなつてしまう。

この様にして出来上つた伝導性の路には雲の下部の負電荷が分布されて行く。先駆が大地に近づくと、誘導された大地の正電荷との間の強い電界のために急速に正ストリーマーがこの伝導的になつた路を上昇し、路上に分布した負電荷を中和し、結果的には雲の負電荷を大地まで下してしまうことになる。これが帰閃である。更に雲に残つた負電荷の誘導によつて更に僅かながら帰閃の電流が続いて残光を作る。その後におこる第2、第3の閃光の先駆ではまだ前の帰閃による電離がかなり残つているので、階段状にならずに急速に進むことができる。

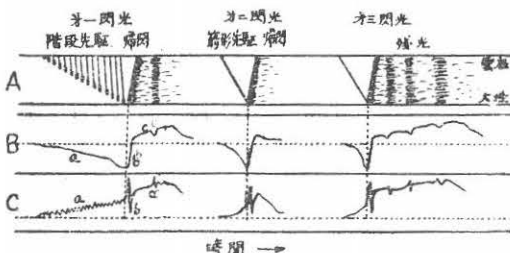
これら1回の電光によつて運ばれる電荷は想像される程大きくなく、最高 160 クーロン、普通は 20 クーロン位である。しかしこれが極めて短時間に大地に運ばれるので、帰閃の電流は最高で 20 万、普通でも 3 万アンペアに達する。雷雲の下部の負電荷と大地の間の電位差は 1 億乃至 10 億ボルト位、又この際消費されるエネルギーは約 50 億カロリー位で大部分は熱と音になつてしまう。

III. 雷に伴う電界の急激な変化

1. 各閃光に対する変化

落雷の際には電光の状態に応じて地上の電界も急激な変化をする。この変化の波形は落雷点から観測点までの距離によつてかなり変る。第1図Bは近距離 (5 km 以内)、Cは遠距離 ($12\sim 20 \text{ km}$) の雷に対する変化で、Aに示した電光の状態と時間を対応させてかいてある。先駆、帰閃、残光に対応する変化は夫々、a, b, c変化とよばれている。

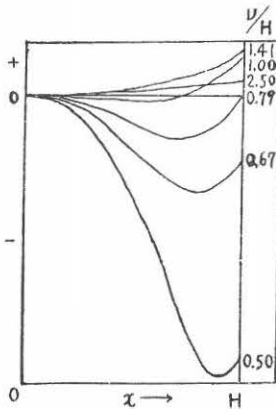
a変化は遠距離では正の方に变化するが、近距離で



第1図

A: 電光の構造 B: 近距離の電界変化波形
C: 遠距離の電界変化波形

は逆に負になる。これは高さ H にある負電荷の中心から負のストリーマーが鉛直に x だけの距離下降し、この路上に一樣な密度で負電荷が分布すると仮定して計算すると、水平距離 D だけはなれた地点での電界の変化量は第2図に示す様になる。横軸が x 、縦軸が電界の変化量で、 D/H をパラメーターとして示した。もし先駆の速度が一定ならば、 x は時間に比例するから図中の曲線が種々の距離での a 変化の形を近似する筈である。 a 全体の変化量は $x=H$ のときだから、 $D < 0.79 H$ ならば負、 $D > 0.79 H$ ならば正になる。



第2図 距離に対する a 変化の波形変化

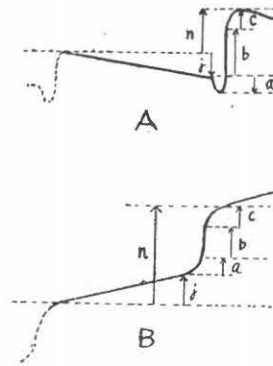
近距離の a 変化では脈動が見られないが、遠距離では階段の週期に相応した週期の脈動が見られる。このことは電氣的にみるとパイロットストリーマーの方が主な過程で、光の強い階段ストリーマーはむしろ二義的なものと見てよいことをあらわしている。 b 変化の場合も同様に遠距離で見られる大きい急激な脈動が近距離では見られず、ただ大きく正の方に变化するだけである。これは急変化部分をおおいかくした優勢な静電界が最も急速に減衰するためである。

c 変化は近雷では認められない場合が多いが、それがあるときは必ず中に小さい鉤型の変化を伴う。この変化は時間的には丁度残光中の光の強い成分に相当している。遠距離では、特に多重になつた後の方の閃光で、 b 、 c 変化が長く脈動の数も多く複雑になつて、両者の区別がつけにくくなるが、近雷の場合より c 変化の割合は大きい様である。

上記 a 、 b 両変化の変化量は遠距離では大体等しい。

2. 各閃光の休止間におこる変化

多重の電光の各の閃光休止間の変化も第3図に示した様に上述の a 変化の場合と全く同様に近距離では



第3図

A: 近距離の静電界変化 B: 遠距離の静電界変化

負、遠距離では正に静かに変化する。図中の j がこの変化量である。所が中距離 (5~12 km) では勿論正負両様の变化があるが、閃光の順番に対してある傾向を有していることが分つている。即ち初めの方の閃光は遠距離の場合と同様、 j 変化は正であるが、順番が進むとともに零になり負に変化する。この j 変化の転移は、 a 変化の場合とは逆に前の帰閃によつて上昇した正電荷が、雲中を更に上昇することによつておこる変化だと考えられる。この様な考えに基いて計算すると、変化の符号は同様に D/H という量で決定されるわけで、 $H < 0.71 D$ ならば正、 $H > 0.71 D$ ならば負になるのである。だから中距離の多重閃光での上述の転移は、 j 変化を作る放電の位置が次第に高い方に移つて行くことを示している。

この結果から多重に閃光の分れる有様は第4図に示す様になる。この図は $(n-1)$ 番目の閃光の最後の c 変化の部分から後の経過をあらわしている。即ち帰閃は先駆によつて路上に分布した負電荷を中和し、結果的には負電荷を大地まで運び下した後、更に雲に残つた負電荷の誘導によつて大地の正電荷が上昇し、放電した負電荷がもとあつた場所を占める。この正電荷の量 $+q$ は、路の抵抗が急速に増加するので余り大量になることはできない。この正電荷は更に上部の負電荷の作る静電界によつて上昇し、次の放電の路をつくる。そして自らは伝導的になつた領域の負電荷 $-Q$ の一部と中和してしまふが、残りの負電荷、 $-(Q-q)$ が n 番目の先駆となつて大地に下る。以下この様なことが繰返される。即ち多重の閃光は雷雲中で垂直柱状に分布した負電荷領域から次々とおこるのである。

又 10 km 以遠の多重閃光の最後に、0.15 sec 位の継続時間をもつかなり大きい正変化の見られることがあ

るが、これは雲の頂上部の正電荷と雲より上空にある負の空間電荷との間の放電によるものと考えられる。

3. 雷雲中の電荷分布

上に述べたことから分る様に、雷雲中の電荷の位置を地上の1箇所での雷放電に伴う電界変化から推定する方法としては、次の様なものが考えられている。

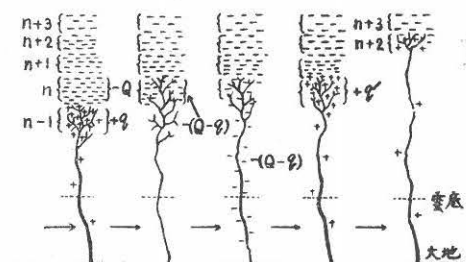
a 変化過程の継続時間から求める法。

a, b 両変化量の比較から求める法。

j 過程の電界変化量の転移から求める法。

これらの結果は1番目の閃光の放電電荷の中心は、地上3~4 kmの高さで、以下閃光の順番とともに上昇し、最後の高さは凡そ9 kmに達する。一閃光あたりの高さの増加は平均して約0.7 kmで、閃光の数が増せば少くなる傾向がある。電光となつて大地へ移る負電荷は上述の様に殆んど鉛直の柱状に分布しているが、この柱はある場合は約6 kmの高さを有し、その底は実際の雲底より1 km位高い。だから柱の底部の温度は 0°C 近くであるが、頂上はしばしば -40°C にも達する。これは気球を飛ばして行われた雷雲内電荷の直接測定と同様な結果で、これら負電荷のできる主な機構は水滴に関するものでなくて、氷粒に対して考えられなければならない。

現在わかっている雷雲の簡単な場合の電荷分布は前にも一寸触れた様に、下部の所々上昇気流の激しい所に正電荷の局所的な集りがあるが、大部分は上が正



第4図 多重閃光の経過

で下が負という形になつている。これらの電荷の発生する機構については種々の説があつて未だ確かでない。ただ下部の局所的な正電荷に対しては、この位置の温度が 0°C 以上なので“滴効果”とよばれる水滴分裂説で十分説明できる様である。大部分をしめる負電荷、正電荷、あるいは雷雲外の上にあると思われる負電荷については、氷粒の氷結あるいは昇華の際の帯電とか、氷の摩擦や破壊によつて生ずるものとかが考えられている。

あとがき

以上主として南アフリカにおけるB. F. J. Schonland等の研究結果に基づいて、電光の構造、放電機構、雷に伴う電界変化につき簡単に述べた。電光の性質は空電の発生機構を研究する上には非常に重要なので、欠けた所が多いが敢てここに紹介した次第である。