

# 氷晶の分裂と雷雲の電気発生

小 口 八 郎

はじめに

雷雲の電気発生の原因については、昔からいろいろな説が提出され、それらの諸説を裏付けるための観測や実験もたくさんなされて来た。

現在、一応実験的にもちゃんとした根拠をもち、実際の雷雲の電気分布をある程度合理的に説明できて、学会からもひろく支持されている説は、次の三つである。

第一の説は、シンプソンの提出した水滴分裂による帯電説で<sup>(1)</sup>、歴史的に一番古い。この説は、水滴が細かく分裂する際に、分裂した水滴が正に、まわりの空気が負に帯電するというレナード効果に基いて立てられた説である。シンプソンは、雷雲の中で、落下してくる大粒の雨滴は、はげしい上昇気流のために分裂し、その際に、比較的重い正の水滴と軽い負の空気との間に電気分離が起るものと考えた。

第二の説は、ウイルソン氏 (C. T. R. Wilson) の水滴によるイオン捕捉説<sup>(2)</sup>である。この方は、電場中を雨滴が落下するとき、感応で雨滴が分極して、大気中のイオンを撰択捕捉するために、電気分離が起るとする説である。普通の大気状態のときでも、地面の上の空間には、下向きの正の電場 (強さは約 100V/m) ができていることが、この説のよりどころのひとつとなっている。

第三は、ワークマンとレイノルズによって最近提唱された、凍結に伴う電気分離の説<sup>(3)</sup>である。この説の根拠になっているのは、水が凍結するとき、液相の水と固相の水との間に電気分離が起るという実験事実である。両氏は、この事実を雷雲の過冷却層の降水要素の凍結に適用して、凍結過程にある粒子が相互に衝突するとき、液相 (小粒子で正に帯電) と固相 (大粒子で負に帯電) と分裂して電気分離が起るものとみなしている。

雷電の電気発生に関する以上の三説の外に、北大低温研究所の吉田順五博士の提案した氷晶の摩擦及び破壊による電気分離説<sup>(4)</sup>もある。

これ等の諸説は、それぞれちがった原理に基いて立てられてはいるが、何れも実験的な根拠をもっているから、何れが正しく、何れが間違いであるというわけにはゆかない。一方、複雑且つ微妙な雷雲の機構からみても、ひとつの説だけから電気発生機構を解明しようと

することは危険で、むしろいろいろな発生機構が併存しているとみる方が自然であろう。

筆者は、ごく最近、氷晶が急速に成長するとき、自然に分裂して帯電するという新しい事実を見え出し、いろいろ測定してみた結果、従来知られていなかった電気発生機構の実験的事実をつきとめたので、その概略を紹介して参考に供することにした。

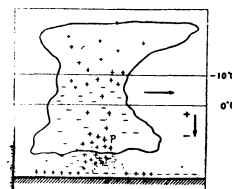
## 雷雲の電気分布

雷雲の中で電気がどのように分布しているかを知ること、電気の発生機構を探る上に重要な手がかりとなるので、電気分布の実測は、いろいろな方法で試みられている。この分野でも、きわ立った立派な研究を残したのは、水滴分裂による電気発生説を出したシンプソン氏である<sup>(5)</sup>。彼は、独創的な電場測定用の測器を考案して気球にとりつけ、雷雲中を飛ばして自記させるという方法をとった。印度のシムラにおける十年余にわたるシンプソンの研究は、貴重な資料な資料を生み、雷雲の電気分布の定型とまでなっている。

近ごろでは、各国で飛行機による実測も盛んとなり、この方面の研究分野がいちだんと拡張されつつある。

第1図に示した雷雲の電気分布図は、最近アメリカで観測された例で、雷雲の電気の垂直分布を示したものである。

Charge distribution of a thunderstorm cell



第1図 雷雲の電気分布  
The thunderstorm, project  
of the U. S. thunderstorm.  
Directed by H. R. Byers  
(1949) より転載

の中央、雨の強く降る付近 (第1図の中で P で示された円のところ) は、上昇気流のいちばんはげしいところであるが、ここには局部的に正電気が集中している。

なおこの図で注意すべきことは、電気分布と温度との関係である。雷雲、殊に熱雷は、地上数百米から1万米

第1図からも分るように、雷雲の著しい特徴は、雲の上部に正電気が溜まり、下部の方に負電気が集まっていることである。しかし、両者の中間、つまり雲の真中あたりでは、正負が入り混り、分布はかなり複雑になっている。また雲の低部

以上に達する大積乱雲であるから、雲の中の温度も広範囲にわたり、電気分離の起る場所も、常温近くから零下の低温までひろく分布しているとみなくてはならない。いろいろな観測の結果を総合すると、電気分離層は $-10^{\circ}\text{C}$ 乃至 $-20^{\circ}\text{C}$ ぐらいの上層にまでは充分達していると考えられる。

このような低温度の層の中にある降水要素は、水滴だけであると考えにくいので、電気分離を起こす主人公として、どうしても雪や水の粒を取上げてみなくてはならない。

それでは、第1図に示したような実際の雷雲の電気分布と温度分布に対して、前に述べた電気発生説の諸説は、どのように説明されるであろうか。

### 電気分離の機構

従来の電気発生説の中でシンプソンの水滴分裂説とウィルソンの水滴によるイオン捕捉の説とは、どちらも電気分離を起こす主人公は水滴であるから、両説で説明できるのは、雷雲の低部、高くともせいぜい $0^{\circ}\text{C}$ 前後の層で起る分離に限られる。第1図のPの付近、即ち、上昇気流のいちばん激しいところの正電気は、シンプソンの水滴分裂によって説明される。つまり上昇気流の激しいところでは、落下する大粒の雨滴が分裂して正に帯電して下層に溜り、負に帯電した軽い空気が上層にはこぼれる。P付近からはずれた下層部の負電気の方は、ウィルソンのイオン捕捉説によるものであろう。この場合には、第1図に太い矢印で示されているような電場の中を雨滴が落下するので、雨滴の上側が負に下側が正に極し、雨滴の下側で負のイオンを捕捉して、滴全体として負に帯電するものと考えられる。

次に、ワークマンとレイノルズ両氏の凍結に伴う電気分離説であるが、この方の電気分離を引き起す主人公は、氷晶(又は氷粒)と過冷却水であり、従って零度以下の低温度の電気分離の説明に都合がよい。両氏は、雷雲中の降水要素が液相と固相とに分裂する機構を、着氷の場合になぞらえて、次のように説明している。氷晶又は霰のような氷粒が過冷却した雲粒中に落下すると、衝突して着氷を起こすが、衝突速度や気温の条件によっては、水滴が全部氷結せず、一部分液体となって残る場合がでてくる。このような着氷が起っているとき、氷と雲粒との衝突、又は着氷粒同志の衝突が激しいと、液相の部分が千切れて分裂するチャンスが多くなる。大きい氷と小さい氷さい水滴の分離が起ると、大きい氷は負に帯電して下層に溜り、小さい正の水滴は上層流にはこぼれて上層に集まる結果になる。このような機構によつて、雷雲の上層部には正電気が溜り、下層に負電気が集まると両氏は結論している。しかし、こうした機構は、単に推定であつて、両者の行った実験結果から引出した結論としてはかなり疑問がある。

ところで実際の雷雲では、地表附近の湿潤な大気が急上昇しているのであるから、雲中の水蒸気密度は非常に大きく、従つて雷雲の上層の低温層では、氷晶が急激に成長しているに違いない。とすれば、氷晶の成長に伴つた電気分離の可能性も一応問題にする必要がある。

氷晶の成長とは別に、氷晶のまさつ、破壊等もまた有力な電気分離の原因となるが、この方は、吉田博士が大変な苦心を拂つて実験し、一説を提案していることは前に述べた。しかしまさつの帯電機構は非常にむづかしく、たしかに原因のひとつではあるが、実験結果を実際の雷雲にそのままあてはめることは少し危険であるように思われる。

筆者は、氷晶の急激な成長が、電気分離のひとつの原因になるのではないかと考え、人工的に霜を作って、成長に伴う氷晶の帯電をしらべてみた。氷晶の成長に伴う電気分離の有無は、測定の不完全さもあつて、はっきりした結果は得られなかったが、その副産物として、氷晶が急激に成長するときに、氷晶の先端が千切れ、その微小な氷粒が異常に帯電することを見え出した。それで、現在は、氷晶の成長に伴う分裂粒子の帯電を中心にして研究を進めている。まだ研究をはじめてから間もないので、詳しいことは分らないが、氷晶による電気分離の有力なひとつの原因になる見込は充分ある。次に、今までの測定で分つた結果のあらましを述べてみよう。

### 氷晶の成長と分裂

常温の大気中で、銅板又は銅棒をドライアイスのようなごく冷たいもので、 $-20^{\circ}\text{C}$ 〜 $-30^{\circ}\text{C}$ ぐらいに急冷すると、そのまわりの空気が冷やされ、その中に含まれていた水蒸気が、飽和に達し、板や棒の表面に氷晶となって急速に成長してくる。氷晶の成長速度や結晶形は、冷却される温度、空気中の水蒸気量などによってそれぞれにちがってくるが、常温の自然の大気では、冷却の温度が低いほど氷晶の成長速度は大きい。例えば(銅板面を約 $-20^{\circ}\text{C}$ )に冷した時に伸び出した霜は、はじめ細長く急速に成長してゆくが、次第に先端が大きくなる。このような霜の先端を注意して見ていると、先端部が千切れて、小さい氷粒となって落下する。この分裂の機構は大體次のように考えられる。板面に成長する霜は、第2図でも分るように、水面が凍る時のように一様に成長しない。ひとつひとつの霜は、ほぼ独立的に伸び出し、しかも成長の速度はかなり不同を示している。この場合、氷晶の成長に必要な水蒸気は先端から補給されるので、先端部は次第に枝分れができて大きく成長するが、根元の方は、もともと細い上に、更に昇華蒸発が加わつて、ついには切れてしまう。このように、温度傾度がひどく、霜の成長がはげしいときには、乱流や衝撃などの力学的な要因がなくても、氷晶の分裂が起るのである。

温度傾度が非常に大きい場合には、上述の分裂機構と

はちがった型が現われる。この方は、氷晶の先端が、途中から弾き出されるように分裂して飛び出す種類のものである。このような分裂機構はよく分らないが、ひとつの推察としては、急激な温度傾度のために、霜の枝の途中が急激に冷却され膨脹して、異常な歪力が集中して、突発的に部分破壊が起るのではないかと思われる。

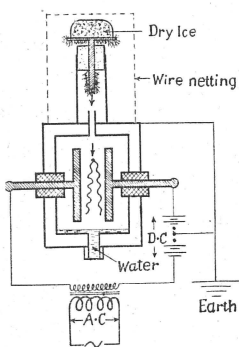
何れにしても、氷晶の分裂は、氷晶の急速な成長に伴う一般的な現象であり、雷雲の中でも、氷晶の分裂の起る可能性は充分あると考えられる。

氷が破壊されたり、千切れたりする場合には、電気分離が起るので、氷晶分裂の際にも同じような可能性は充分ある。しかし、その帯電量は、ごくわずかであると考えられるから、その電気量の測定は普通の方法ではむづかしい。

筆者の行った実験では、分裂氷晶の大きさ、ごく小さいもので、水滴に直すと、直径で 30~100 $\mu$  のものが多い。大体、大粒の雲粒程度である。このような小粒子の個々の帯電量を測る方法としては、ウェルズとジャークの両氏が創案した交番電場による方法が都合がよい。この方法は、既に、分裂水滴の帯電量や、塵埃の帯電量の測定に利用されて、面白い結果が見え出されている<sup>(6)</sup>。筆者の採用した方法も、これらの装置とほぼ同じ型式のものである。

**分裂氷晶の電気量の測りかた**

氷晶が成長するとき分裂した小さい帯電粒子の電気量を測る装置は、第3図に示すようなものである。銅板又は銅棒の先をドライアイス又は寒割で冷却して、霜を成長させ、その先端から分裂して落ちるとさい氷の粒をそのまま自由に落下させて、交番電場のかけてある電極の間に導く。小さい水粒は、電極の間に達するまでに、溶けて水滴となる。実は水滴にしないと、粒子の大きさが測れないので、わざと溶かすわけであるが、この合に場、



第2図 帯電粒子を測る装置

氷晶の成長するところは、大気電場の影響をとり除くために金網で覆って接地してある。

水滴が蒸発しないように注意することはもちろんである。

電極の間には、普通の50サイクルの交番電場が、約1000~2000V/cmの強さでかけられている。もし落下してくる粒子が帯電していると、この交番電場の作用で、左右の極から引かれたり反撥されたりして、粒子の落下軌跡はサインカーブの波形を描く。

落下粒子の描く波形と帯電量との間には、次のような関係があることが分つて

いる。

$$A = \frac{ne}{m} \cdot \frac{1}{2\pi^2 f^2} \cdot \frac{\sqrt{2} V_e}{300 d} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (g/2\pi f^2 \lambda)^2}}$$

$$Q = ne.$$

$$v = f\lambda = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \rho - \sigma}{\eta} \cdot g$$

$m$  = 水滴の質量(g),  $Q$  = 水滴の電気量 (e.s.u.)

$e$  = 電気素量 ( $4.8 \times 10^{-10}$  c.s.u.),  $A$  = サインカーブの振幅(cm)

$\lambda$  = サインカーブの波長,  $d$  = 電極間の距離

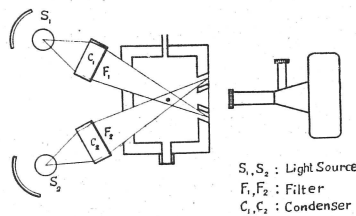
$\eta$  = 空気の粘性係数(g/cm.sec.),  $f$  = サイクル数(50)

$v$  = 粒子の落下速度(cm/sec.),  $V_e$  = 実効電圧(Volt)

$\rho$  = 水滴の密度(g/cm<sup>3</sup>),  $\sigma$  = 空気の密度(g/cm<sup>3</sup>)

$g$  = 重力加速度(cm/sec<sup>2</sup>.),  $r$  = 粒子の半径(cm)

以上の諸量のうちで、 $e, d, \eta, f, \rho, \sigma, g$  既知であるから、実験から落下曲線の  $A, \lambda$  を測れば、 $v, m$  等も上式から計算によって求めることができ、粒子の帯電量の絶対値  $Q = ne$  が分る。なお、電気正負は、交番電場だけからは分らないので、筆者の場合には、交番電場に直流電場を重ねてかけた。直流電場の強さは落下曲線の形に影響するので、なるべく弱い方が望ましい。この場合には、100~200 V/cm にした。こうすると、帯電粒子は、サインカーブを描きながら、直流電場のために少しづつ左右に偏奇して落ちるので、その粒子の電気正負が判定出来るのである。



第3図 暗視野照明法

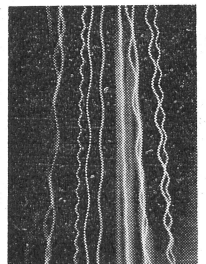
光源の熱をとり除くために、吸熱フィルターをつけた。

電場中を落下する帯電粒子の軌跡を写真にとるには、第3図に示すような暗視野照明法を用い、低倍率の顕微鏡又は接写レンズで

少し拡大して撮る。第4図に、粒子の描く落下軌跡の1例を示した。分裂した氷粒は、大部分が正又は負に帯電していることが分るのであろう。

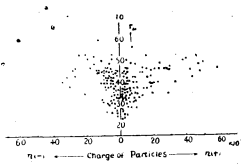
**測定の結果とその吟味**

いろいろな条件で氷晶を成長させ、その時に分裂する多数の粒子について、前にのべたような方法で、帯電量とその正負を調べてみた結果、氷晶が急激に成長する時には、必ず分裂が起り、分裂粒子の大部分は正又は負に帯電す



第4図

電場中を落下する粒子の軌跡  $\times 15$  直流電場は左側が $\oplus$ で、右側が $\ominus$ 、交番電場の強さは1800 V/cm (実効値)



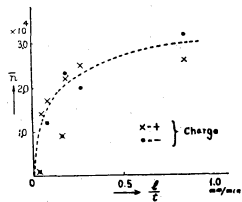
第5図 分裂氷粒の電気分布  
×印は氷晶の成長が速いときの例で、●印は成長速度が小さいときの例である。

第5図の中で、印で示した例は、氷晶の成長速度が小さい場合で、×印で表わした方は成長速度が非常に大きい場合である。どちらの場合にも、個々の粒子の帯電量は、正負ともに、粒子が大きくなると帯電の絶体量が増す傾向を示している。この傾向は、分裂粒子の帯電量が表面積の増加に比例する水滴の分裂の場合によく似ている。しかし帯電量の方は、分裂氷晶粒子の方が分裂水滴の場合よりは数倍大きい。

次に正負を比較すると、正粒子と負粒子との数及びそれ等の総電気量は、両者大体同じくらいである。多数の例を総合すると、氷晶の成長速度によって、正負のバランスがはっきり崩れるという場合は見当らなかつたが、全体として、正帯電の方が少し勝っている。

なお注目すべきことは、第5図の二つの例からもはっきり分るように、分裂粒子の帯電量は、正負ともに、氷晶の成長速度によって著しく影響されることである。

氷晶の成長速度をいろいろに変えて、その時現われる分裂粒子の帯電量を測り、平均帯電量を求めて、それと成長速度とを較べてみると、第6図に示すようになった。



第6図 氷晶の成長速度と粒子の平均帯電量との関係

$n$  は、大体 200~300 個の粒子についての電気量の平均値である。

成長速度が増すと、帯電量が急激に増すことが分る。この原因は、今のところよく分らないが、成長が激しいと、温度傾度も大きく、分裂も急激に起り、それで電気の分離もはげしくなるのではないかと思われる。なお、成長速度が大きいと、分裂粒子の個数も多いが、成長速度が小さいと

ことが分った。

第5図に測定結果の2つの例を示した。図の縦軸に粒子の大きさ(半径)をとり、横軸を左右に分け、正負の電気量を別々に示してある。電気量を表わす単位は、電気素量の何倍かを示す  $n$  を用

きには、分裂個数も激減する。従つて、氷晶の分裂による電気分離は、全体として成長速度が大きいほど著しい。

以上の事実は、雷雲中の電気分離を説明する上に都合がよい。即ち、普通の氷雲の場合には、氷晶の成長速度が小さいので、分裂も少く、また電気分離も弱い。これに対して、雷雲では、上昇気流がはげしく、地面附近の暖かい湿潤な空気が速かに上層にはこぼれるので、雷雲中の氷晶速度は異常に大きく、氷晶ははげしく分裂して、異常な電気分離を起す。分裂の機構は、はっきり言われないが、分裂する小さい、氷粒が全体として正に帯電し、分裂の母体となる元の大きい氷晶は負に帯電するということが予想される。このような機構を考えれば、雷雲の上層が正に、下層が負に帯電することが説明される。

しかし、筆者が今までに得た実験結果からは、未だははっきりした結論を出すことはできない。多くの問題は、まだ今後に残されているとみるべきであろう。

文 献

- (1) Simpson, G. C., On the Electricity of Rain and its Origin in Thunderstorm. Phil. Trans. 209 (1909)
- (2) Wilson, C.T.R., Some Thundercloud Problems. Journ. Frank. Inst. 208(1929)
- (3) Workman, E. J. and Reynolds, S. E., Electrical Phenomena Occurring during the Freezing of Dilute Aqueous Solution and their Possible Relationship to Thunderstorm Electricity. Phys. Rev. LX X VIII (1950)
- (4) 吉田順吾. 氷の摩擦破壊によつて生ずる電気ならびに雷の電気  
低温科学 第一輯 (昭和19年)
- (5) Simpson, G. C. and Robinsou, G. D., Proc. Roy. Soc. London A. 177 (1941)
- (6) Nakaya, V. and Terada, T. Phil. Mag. Ser. 7. XX (1935)

川崎弘司 電気試験所報告 506 (昭和24年)  
(東京芸術大)

風に関するシンポジウム

昨年「風に関するシンポジウム」を開きましたところ、非常に好評と成果を得ましたので、本年も下記の次第によって第二回の「風に関するシンポジウム」を開くことになりました。よつて下記の通りお知らせいたします。

研究発表御希望者は期日までに申込み下さい。

記

日程 10月17日(月) 地形と風に関する研究発表  
18日(火) 午前9時 特別講演

ジェットストリームについて。防風林について。

午後一時

風に関するシンポジウム

場 所 気象研究所 (杉並区馬橋4丁目・国電 高円寺下車)

鑑演申込みノ切 9月25日

申込み先 気象研究所 神山恵三

日本海洋学会 日本火災学会 日本気象学会 日本航空学会 日本地理学会 土木学会 日本農業学会共催