



Title	氷の摩擦破壊によつて生ずる電気並びに雷の電気の發生機構
Author(s)	吉田, 順五
Citation	低温科學, 1, 149-187
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17391
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p149-187.pdf



氷の摩擦破壊によつて生ずる電氣 並びに雷の電氣の發生機構

吉 田 順 五

§ 1. 緒 言

摩擦電氣の現象は電氣現象のうちで最も早くから知られてゐるにも拘らず、今日に於ても充分な智識が得られてゐない。たとへば廣く知られてゐるヴォルタ系列の如きも決して絶對的のものではない。摩擦面を非常に清淨にしておくと、發生する電氣の符號が系列内の順位によつて定められる符號と逆になることがある。⁽¹⁾ 又同じ物質からなる二物體を摩擦させても電氣は發生する。摩擦面の汚れや吸着ガスの影響を除く爲、Coehn は真空中に於て物體を摩擦させて、摩擦する二物體のうち電媒常數の大きい物質からなるものが正に、電媒常數の小さいものが負に帶電すると云ふ法則を見出した。⁽²⁾ 併し摩擦電氣は物體の表面の不純物のみでなく、摩擦面の形や、曲率や、歪などによつても影響されることが知られてゐる。

摩擦面の形の及ぼす効果を見るには、同一物質からなる物體の間の摩擦電氣を調べるのが最もよいと思はれる。粉體を吹飛ばしたり落下させたりして、粒の間に摩擦を起させた場合に發生する電氣については澤山の研究がなされた。一般に粉體は大きさの異なる粒の集合であつて、一つ一つの粒の形も異なる。それで、例へば大きい粒と小さい粒とで電氣の符號が異ると云ふやうなことが見出されれば、摩擦面の形の及ぼす効果も判つて來るであらう。又粉體と同じ物質からなる形の大きい物體、例へば板などに粉體を摩擦させても、この効果を調べる事が出来る。併し多量に得られる粉體は通常不純物を含むことが多く、又同一物質で粉體の形のもの大きい形のものとの得ることは一般に困難である。従來、粉體の摩擦電氣の研究に於ては、粉體を盛る器を粉體と同じ物質で作れない爲に、異物質間の摩擦を取除くことが出来ず、それが妨げとなつたことが多い。一般に異物質間の摩擦電氣は同一物質間の摩擦電氣に比べると非常に大きいものである。この點に於て氷を用ひることは大變に都合がよい。氷は大きい形でも得られるし、霜や雪として粉體の形としても多量に得られる。そして不純物も含まない。

§ 2. 雷の電氣の成因

現在 Simpson⁽³⁾ と Wilson⁽⁴⁾ との説が有力である。Simpson は水滴が空氣中で分裂するとき

北海道帝國大學低溫科學研究所報告第 14 號。

(1) P. E. Shaw: Proc. Roy. Soc. London (A) 118 97 (1928).

(2) A. Coehn: Ann. d. Phys. 64 217 (1898); 30 777 (1909); ZS. f. Phys. 5 242 (1921).

(3) G. C. Simpson: Phil. Trans. 209 379 (1909).

(4) C. T. R. Wilson: J. Frank. Inst. 208 1 (1929).

分裂した水滴は正電氣を得、附近の空氣は負電氣を帯びると云ふことを實驗的にたしかめ、それによつて彼の雷の説を立てた。Wilson は空氣中に存在するイオンと大氣電場とによつて、雲を作つてゐる水滴に負電氣が與へられると云ふことを理論的に導いた。何れの説も雷の電氣の成因として雲の水滴を基礎において考へてゐたが、其の後 Simpson⁽¹⁾ によつて行はれた氣球による雷雲内の電場分布測定の結果、雷雲の上部に於ても盛んに電氣が發生しつつあることが明かにされた。大氣のこのやうな上層に於ては氣温は -10°C とか -20°C とかの低温である。この程度の所にある雲は過冷却水滴からなる場合もあるが、多くは氷の粒からなると考へられる。したがつて雷の電氣の發生には氷の粒の間の交互作用が關係してゐると考へなければならぬ。先世紀の後半、既に、雷雲の峰近くに現はれる卷雲に着目して雷雲内には水滴のみならず氷の粒も混つてゐるとし、雷の電氣を氷と水との摩擦電氣、或は氷と水との間の接觸電位差によつて説明しようとする試みがなされた。⁽²⁾ それについて、實驗も多少行はれたが、明確な結果は、得られずに終つた。

以下は氷同志の間の摩擦、又氷の破壊などによつて生ずる電氣を調べた結果の報告である。摩擦體の形と摩擦電氣との關係を明かにし、併せて雷の電氣の發生機構に對して考察を與へようとするものである。實驗はすべて北海道帝國大學低温科學研究所の低温實驗室で行つた。この實驗室は本室と副室との二つからなり本室は -25°C ~ -30°C 、副室は -10°C ~ -15°C に常時保たれてゐる。

第 I 章 豫 備 實 験

氷の摩擦電氣について豫備的智識を得る爲に、氷の粒に簡単な處置を施して發生する電氣を調べた。實驗は低温實驗室副室に於て行ひ、氷の粒としては實驗室の天井に設けられた冷却管についてゐる霜を搔き取つて使つた。この霜は普通 1~2 mm の大きさのものであるが、なかには 5 mm から 10 mm もある大きい粒もあり、又極めて細かくて吹飛ばせば暫く空氣中に浮遊してゐる程度の粒も混つてゐる。結晶の形は肉厚の扇形で、昇華の爲結晶の角は圓くなつてをり鋭い角はあまり見られない。寫眞 No. 95, 96, 97 はこの霜の結晶の顯微鏡寫眞である。最も多量にある霜が寫眞 No. 95 の霜でこれが主體をなし、寫眞 No. 96, 97 に示すやうな小氷片を含んでゐる。寫眞 No. 96, 97 は霜を落下させながら風を當てて吹飛ばされたものを硝子板に受けとめて、寫眞にとつたのである。寫眞 No. 97 のものはもとより、寫眞 No. 96 のものも空中に暫く浮遊するくらゐ小さく、寫眞 No. 96 の微粒の如きは電燈の光に當てるとキラキラ輝きながら空氣中に舞つてゐるのが見られる。

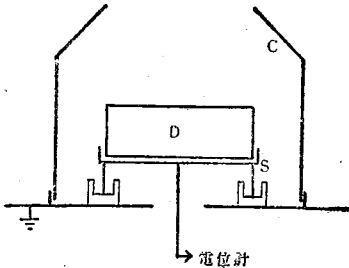
(1) G. C. Simpson: Proc. Roy. Soc. London (A) 161 309 (1937); 177 281 (1941).

(2) L. Sohncke: Ann. d. Phys. 28 550 (1886).

§ 3. 氷の粒の帯電量の測定装置

氷の粒にはいろいろな處置を施すので、場合々々により測定装置も變へなければならないが、電氣の測定法としては専ら靜電的方法をとつた。氷の粒の電氣を一つの導體 R に與へ、 R と結ばれた電位計 E によつてその電位 V を決定する。 R と E とを含む測定系の電氣容量を C とすれば、氷の粒の持つてゐた電氣量 Q は CV に等しい。 C の値は任意に變へられる方が測定上便利であるから、測定系には尙可變蓄電器を繋いだ。

豫備的實驗では、電位計 E にアルミニウム箔檢電器を用ひ、箔の開きの度合は目盛望遠鏡で測定した。箔の開きを P 、電位を V とすると、 $\left| \frac{dP}{dV} \right|$ は $|V|$ が小さいときには小さいが、 $|V|$ が大きくなると共に次第に増大して、 $|V|$ が約 80 ボルトを超えると一定の値を持つやうになる。この $\left| \frac{dP}{dV} \right|$ が一定の値を持つ範圍に於ては、目盛望遠鏡の一目盛が 4 ボルトに相當してゐた。氷の粒の電氣はその量と共に符號をも決定する必要があるので、測定系には一度電池を接觸させて豫めある電位 V_i を與へておいた。 V_i には 150 ボルト位の値を擇んだ。氷の粒の電氣を受け取つた結果、電位が V_j になつたとすれば、氷の粒の電氣 Q は $Q=C(V_j-V_i)$ によつてその量と共に符號も定められる。導體 R として最もよく利用したのは第 1 圖の受皿である。



第 1 圖

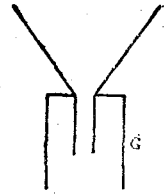
薄い眞鍮板で作つた直径 6 cm、縁の高さ 2 cm のもので、アンブroidで絶縁した臺 S の上にのせてある。外部からの電氣誘導による妨害を防ぐ爲に、やむを得ない場合を除いては常に覆 C を用ひて受皿を遮蔽した。又受皿と電位計を結ぶには 40 番の細い導線を用ひた。可變蓄電器の容量を最小にしたとき、測定系の電氣容量 C は 17 cm であつた。

§ 4. 氷の粒を落下させた場合に生ずる電氣

氷の粒を厚紙の函に入れ、ガラス棒で少しづつ掻き出して第 1 圖の受皿の中に落とすと負の電氣が見られる。落下の高さは 10 cm から 40 cm にかへて見たが、殆ど電氣量に差が現はれない。従つてこの電氣は落下の途中で發生したものでなく、函を出る時に既に氷の粒が持つてゐたものと先づ考へられる。函から直接に受皿に落さず、途中に接地した漏斗を置いて氷の粒の落ちる路を絞つた方が、受皿 D に氷の粒を取るには便利である。漏斗には眞鍮製のものを用ひたが、漏斗を用ひない場合と比べて現はれる負電氣が少し増える。

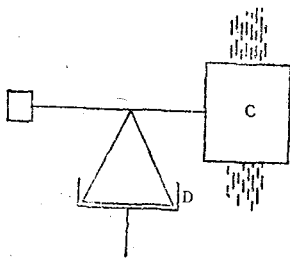
前節に述べたやうに、受皿には豫め 150 ボルト位の電位 V_i を與へてある。この V_i を正にしておいたときと負にしておいた時とで電氣量に差があつて、正にしておくと負にしておいた場合の電氣量の二倍に近い値が得られた。即ち氷の粒の 1 gr 當りについて、正にしておいた時は $-0.2 \sim 0.4$ e. s. u. で、負にしておいた時は $-0.1 \sim 0.2$ e. s. u 程度であつた。その差は氷の粒が漏斗を離れる時、測定系に與へてある電氣によつて感應電氣を得、それを持つた儘落下して來

る爲であるかも知れない。それで漏斗の口の圍りに第 2 圖のやうに保護管 G をつけて、この感應を防いでみたが効果はなかつた。それで受皿の周圍に出来てゐる電場の爲にかかる差異が現はれるものと見なければならぬ。落下させる霜の中には、寫眞 No. 96, 97 のやうな微小氷片が混じてゐる。若しこの小片に負電氣を帯びたものが多ければ、受皿の電位が正のときはそれは吸引されて受皿にその電氣を與へ、受皿が負電位にあれば反撥されてその電氣を與へない。したがつて受皿を正電位にしておけば、負電位にしておいた場合に比べて電氣量が負の値の方向にずれるわけである。それで覆ひ C を取り外して、受皿に電燈の光をあてて見た。併し細い小片が少し許り飛んでゐるのが見えただけで、受皿に吸引されたり受皿から反撥されたりする様子は見られなかつた。



第 2 圖

併し受皿の電位の正負による差異の原因としては、この種の現象しか考へられない。それで電燈の光では見られない、移動度が大きく形は極めて小さい氷の小片か或はイオンが、氷の粒の落下によつて生じた下向の空氣の流れに乗つて下つて來るのではないかと云ふ疑問が起る。もつとも極めて小さい氷の小片にしても、イオンにしても、全部が負電氣を帯びてゐるとは考へられない。正の電氣を帯びるものも混じてはゐるが、負電氣を持つたものの方が多いと考へるのが至當である。このやうな移動度の大きい粒子の存在を見る爲、第 3 圖のやうに太い金屬性の筒 C



第 3 圖

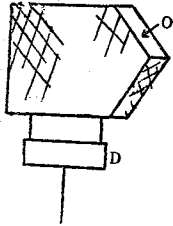
を受皿で支へて、筒の中心部を通つて氷の粒を落下させた。氷の粒は筒と接觸しないやうに落すのである。もし今考へてゐるやうな小粒子があるならば、小粒子の移動度は正、負によつて餘り異るとは考へられないので、負が多いとすれば圓筒を負電位にしておいたときの電位のり高は、圓筒を正にしておいたときの電位のり高より小さい筈である。測定の結果は圓筒を負電位にしておいた時電位の變化が殆ど認められず、正電位にしておいた時は、

望遠鏡の 1 目盛に達しない程の僅かな變化ではあるが電位の下ののを確め得た。第 1 圖の受皿の場合は接地された覆ひ C が近くにあるので電場が強いが、第 3 圖の筒は近くに接地された導體を持たず、したがつてその附近の電場も弱い。又受皿の場合は氷の粒の落下に伴ふ下向氣流がそこで止められるので、イオンなどが吹き去られることが少いが、筒の場合は下向氣流が速くイオンはそれに乗つて逃れて了ふであらう。受皿の電位の正負の効果に比べて筒の電位の正負の効果が小さいのは、この二つの理由によつて説明される。

§ 5. 落下する氷の粒を風で吹飛ばす實驗

記述の便宜の爲に、氷の粒を單に落下させた場合に見られる電氣量、即ち前節に得た 0.1~0.4 e. s. u./gr を標準に擇んでそれを q とし、 q の何倍位の電氣、或は何分の一位の電氣と云ふやうにして電氣量を表すことにする。同じ條件の下に測定を繰り返しても電氣量には相當の差異が

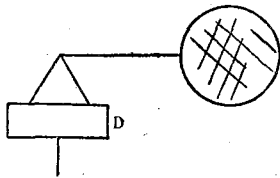
現はれるから、数字を用ひるよりもこの方が便利である。直径約 2 mm の孔から 25 cmHg の壓力で風を吹出して漏斗を通つて落下する氷の粒を吹飛ばすと、大きい粒は近い所に落ち小さい粒は遠くの方に飛んで行く。略 30 cm の距離の處に第 4 圖のやうな金網枠を置く。O の所を



第 4 圖

残して他は全部 0.5 mm 目の金網で張つてあるので、吹飛ばされて來た氷の粒は O から中に入り、そのうち 0.5~1 mm の大きさの粒が捕へられる。もつと大きい粒はここまで飛んで來ないし、もつと小さい粒は大部分金網を抜けて後へ飛び去つて行く。この金網枠に現はれる電気は負で q の數倍である。但しこの q の數倍の電気と云ふのは、金網枠に捕へられた氷の粒の 1gr についてとつたのではなく、落下させた氷の粒の 1gr についてとつたものである。以下に於ても常に落下させた氷の粒の 1gr についての電氣量を考へる。

金網枠の前に接地された金網を張つて 0.5~1 mm の粒をそこで遮つた。この遮蔽用の金網を通過した細い粒でも、尙そのうちの比較的大きいものは金網枠に捕へられる。このとき、金網枠は q の十數倍の正電氣を示した。尙遮蔽用金網に遮られてその前方に落ちる氷の粒は q と同程度の負電氣を持つてゐる。遮蔽用金網が得る電氣をも調べる爲に、第 5 圖のやうに圓い枠に張つ



第 5 圖

た金網を受皿で支へて遮蔽網の位置におき、これに吹飛ばした氷の粒を當てた。氷の粒はこれに當つて遮られて下に落ちて受皿に入ることはない。この時金網は q の數倍の負電氣を現はした。

かくして遮蔽用金網に現はれる電氣と、これに遮られる氷の粒の電氣とは共に負で兩方を加へたものは q の十數倍になる。そ

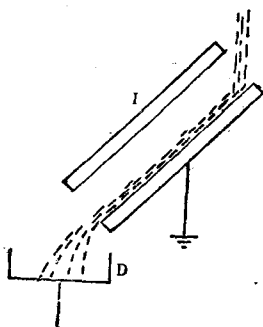
して遮蔽用金網を通り抜けた粒の一部を金網枠で捕へると q の十數倍の正電氣を得るのであるから、これら二つの正負の電氣は量に於て略相等しい。それでこの電氣は氷の粒が初めから持つてゐたものでなく、氷の粒と金網との摩擦によつて現はれたものと推測される。若し初めからこの電氣が氷の粒にあつたとしたら、大きい粒は負に、小さい粒は正に帯電してゐるわけである。併し吹飛ばされてから次第に落下して來る粒を受皿にとつて調べると小さい粒も負電氣を示す。尙この方法では多量の粒を集め得られないので數量的な結果を出すのは困難であるが、その電氣量は少いのであつて、吹飛ばしただけで q の十數倍の大きさの電氣が現はれることが到底あり得ないことは確かである。

緒言に述べた通り、異物質間の摩擦である氷と眞鍮網との摩擦では非常に大きい電氣が発生するので、氷と氷との摩擦によつて生ずる電氣を調べる爲には、この節の實驗方法は適當なものでなかつたのである。従來粉を篩ひ分ける意味で網を用ひた實驗はしばしば行はれた。ここに述べる實驗もやはり網を篩に使うとしたのである。そしてそれは皆實驗方法として適當しないことが此の實驗で明かになつた。

§ 6. 氷の粒を氷塊に衝突させる實驗

前節の實驗により、氷以外の物質を直接氷の粒と接觸させると現象を複雑にする虞れの多いことを知つた。それで次に氷の粒を氷の塊に衝突させて、その際發生する電氣を調べた。漏斗を通じて落下する氷の粒を吹飛ばして接地した氷塊に衝突させ、跳ね返つて落ちるものを電位計につないだ受皿に受ける。大抵の場合 q と同程度の負電氣が見られるが、時々この負電氣が非常に少なかつたり、逆に正電氣であつたりすることがある。この例外の起る原因を調べた結果、冷却管から掻きとつた許りの霜を用ひる時にこのやうなことの多いことを知つた。冷却管から採取した許りの新しい霜と、採取してから暫く放置して蓄くなつた霜とについて考へられる差異は、新しい霜が古い霜より温度が低く、鋭い角が多いと云ふことである。霜を積上げて寒暖計を差し込んで見たが、新しい霜と古い霜とについて温度の違ひを確かめることは出来なかつた。併しこれは寒暖計と霜との接觸がよく行はれてゐないために、寒暖計に現はれないのであると考へられる。霜の角は顯微鏡で調べたがそれには目に立つ程の差異が認められなかつた。それで氷塊と衝突した氷の粒の負電氣が非常に小さかつたり或はそれが正電氣を帯びたりするのは、主として氷の粒の温度が氷塊の温度よりも低いことによるのであらうと豫想し、その點を尙調べることにした。

この實驗を行つてゐる低温實驗室副室の温度は $-10^{\circ}\sim-15^{\circ}\text{C}$ であるが、副室の奥に隣る本室の温度は $-25^{\circ}\sim-30^{\circ}\text{C}$ である。この本室の冷却管から掻き取つた霜を副室に持つて來て漏斗を通じて單に落下させると多量の正電氣を現はす。落すだけで現はれる電氣は成る可く少い方がよいから、次に漏斗を通さないで函から掻き出して直ちに受皿に落したら、やはり正電氣ではあるが q と同程度の量に減じた。この正電氣を示す本室から採つた冷い霜を副室に置いてあつた比較的暖かい氷に衝突させて、霜の正電氣が増すことが知られば、上に豫想したことが當つたことになる。漏斗を通さない氷の粒の落下する途が幅廣くなつて、風で吹飛ばすには不便である。それで吹飛ばすことをやめ、氷塊の代りに氷の圓筒を作り、それを第 6 圖の I のやう

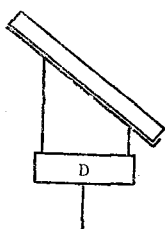


第 6 圖

な位置に置いた。上から氷の粒を孔の中に落とし込み、圓筒の中を通過して落ちるのを受皿に受ける。冷い氷の粒が比較的暖かい氷の圓筒の内面と摩擦するわけである。このやうにすると、 q の數倍の正電氣が現れ、氷の圓筒を通過させない場合に比べて、遙かに大きい。氷の粒として副室の冷却管からとつた霜を用ひて、同様に圓筒を通過させれば q と同程度の負電氣しか現はれない。次に圓筒を本室に置いて充分に冷してから、副室の比較的暖かい霜を用ひて測定すると、 q の數倍の負電氣が現はれた。又圓筒を低温室外に出して、常温の下に暫く暖めて再び副室に入れ、副室の霜を通過させると、 q の數分の一の正電氣を示す。即ち圓筒に入る前には q と同程度の負電氣を持つてゐたものが、温度の高い氷と摩擦して正電氣を得るに到つたのである。尙この場合は、氷の粒の一部は圓筒の内面に附着するので、受皿に

落ちる水の粒は減つてゐる。それ故落下させた水の粒の 1 gr についてではなく、受皿に得られたものの 1 gr についての電氣量として考へれば、ここに現はれた正電氣量も可成大きいものとなる。尙、この圓筒を用ひる實驗では、測定系に豫め與へておく電位の正負による効果は認められなかつた。圓筒の内面には細い氷の粉が附着する。電氣を帯びた氷の小片やイオンは、圓筒の内面に捕へられて外に出て來ないのであらう。

次に、氷塊の方に氷の粒と逆の符號の電氣が出るか否かを調べる實驗を行つた。氷の板を作り



第 7 圖

第 7 圖の I のやうに受皿の上に斜めに支へる。これに氷の粒を落下させた場合に氷の板に現はれる電氣を測つた。氷の粒も氷の板も共に副室の温度にしておくと、豫め氷の板に與へておいた電位が正であつても負であつても、電位計の箔は速かに閉ぢる。所が本室に放置して冷しておいた氷の板を用ひ、氷の粒には副室の比較的暖い霜を使ふと、豫め與へた電位が負の時は箔が速かに閉ぢるが、正の時には箔の閉ぢ方が緩かであり、時には開きがかへつて増しさをする。氷の板を副室の温度にしてをき、氷の粒に本室からとつた冷

い霜を用ひると丁度逆になる。即ち正の電位を與へておいた時箔は速かに閉ぢ、負の電位を與へておいた場合には、箔の閉ぢ方が遅いか又は箔の開きが増す。

以上に述べたことは皆温度の高い方の氷が負に、低い方の氷が正に帯電することを示してゐる。かくして、 0°C から -30°C の温度範圍に於ては、温度の異なる氷の粒と氷の塊とが摩擦すると、何れが粒であり、何れが塊であつても、常に温度の高い方が負に、低い方が正に帯電すると云ふことが明らかになつた。

温度差がない場合、或は温度差が非常に少い場合には氷の粒が負電氣を得、氷塊は正電氣を得るのであらう。函から掻き落した氷の粒は負電氣を持つてゐるが、これを接地した氷塊に衝突させても尙負電氣を失はない。第 7 圖の装置を用ひた實驗で、同じ温度の氷板と氷の粒との接觸によつて、氷板の持つてゐた電氣が速かに氷の粒に移つて行くことが示された。それ故負電氣を持つた氷の粒が接地された氷塊に接觸すれば、その負電氣は氷塊に奪はれる筈である。それにも拘らず氷塊の表面で跳ね返つた氷の粒が、負電氣を示すのは、衝突の際に新たに氷の粒に負電氣が與へられることを示すことになる。

第 7 圖の装置を用ひる實驗で、氷の粒と氷の板とを同温度にしたとき、氷の板は最後にはある値の正の電位に達して止つてゐたのであらう。唯この電位が低い爲に箔電位計の感度の悪い範圍に落ち、認められなかつたものと考へられる。

§ 7. 豫備實驗の結果の總括

(1) 氷の粒(低温實驗室の冷却管に生じた霜を掻き取つたもの)を落下させると、正負に帯電した非常に細い氷の小片或はイオンが現はれる。そして正に帯電してゐるものより負に帯電してゐるものの方が多い。

(2) 温度が相當に異なる氷塊と氷の粒とが摩擦すると、温度の高い方が負、低い方が正に帯電する。

(3) 同温度の氷塊と氷の粒との摩擦に於ては、氷塊は正に、氷の粒は負に帯電する。

以上の結果には補足すべきことが二三ある。(1) については、このやうな粒或はイオンの存在も確實に證明されたわけではなく、殊に正の粒或はイオンが本當にあるか否かは全く不明である。ただ他の場合から類推して、負に帯電したものがあればそれに混じて正に帯電したものも存在するであらうと考へたに過ぎない。

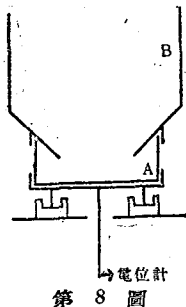
(2) に関しては、どの程度の温度差からこのやうなことが見られるか、又氷の粒と氷塊と云ふやうに非常に形の異なるもの間でなく形の同じ氷と氷との間にも温度差の効果があるかないかを調べなければならない。(3) についても、摩擦體の大きさそれ自身が有效なのか、それとも摩擦面の曲率の大小が有效なのか、と云ふことが問題である。又概括して豫備實驗に於ては實驗に不備な點が多かつた。以後に述べるのは、方法を改良して上の三つの結果を尙詳しく調べる爲に行はれた實驗である。

第 II 章 主として氷の粒を用ひる實驗

この章の實驗は大體豫備實驗に於て採つたのと同じ方法によるものである。豫備實驗に於ける第一の不備の點は、氷の粒が紙函から硝子棒で掻き出され眞鍮製の漏斗を通過した爲に、落下の初めから異物質間の摩擦による多量の電氣を持つてゐたことである。それで函、掻き出し棒、及び漏斗などの全器具を氷で作つたものを用ひることにした。函と漏斗とはトタン板で型を作り、その中に水道の水を入れて凍らして作つた。又掻き出し棒には、針金に肉厚に氷を被せたものを使った。これで氷の粒は氷以外の物質と直接に觸れ合ふことはないことになつた。併し氷の函や漏斗、又針金に被せた氷は普通の水を凍らした氷であり、霜のやうに水蒸氣から昇華して出來たものとは異なる。同じ物質であつても出來方が異れば物體の性質は多少違ふ。それ故これでは未だ完全な條件となつたとは云へないが、後に述べるやうに、かくすることによつて氷の粒が初めから持つてゐる電氣の量は豫備實驗のときに比べて著しく少くなることが知られた。

§ 8. 測定装置

氷の粒を受ける器を改良して第 8 圖のやうなフラダー管にした。豫備實驗に用ひたやうな浅い皿では皿の中に落ちた氷の粒が跳ね返つて外へ飛出すことがあるので、皿 A の上に B のやうな眞鍮製の筒を載せた。B の直径、高さは、夫々 8 cm, 7 cm, であつて、これを用ひれば氷の粒が外へ飛び出すことはない。A と B とは容易に切離すことが出来るので、受けた氷の粒の目方を測る時には B をとり除いて A のみを風袋として



秤量した。尙萬一にも B の壁に衝突してから外へ飛出してふ氷の粒があつたとしても、それの及ぼす影響を小さくする爲に B の表面にはうすい氷の層をかぶせた。氷の粒が B に當つたとき、氷と眞鍮との摩擦を防いで、その際生ずべき摩擦電氣を少くする爲である。

電位計としては、簡単な箔検電器では感度が小さすぎるので、箔に電場をかける型式の電位計を製作した。電場用の極板の間に 100 ボルトをかけて、目盛望遠鏡の 1 目盛の振れが 0.2 ボルトに相當する感度を得た。この電位計では落の振れの向きによつて電位の正負が判るので、豫備實驗に於けるやうに豫め測定系に電位を與へておく必要はない。

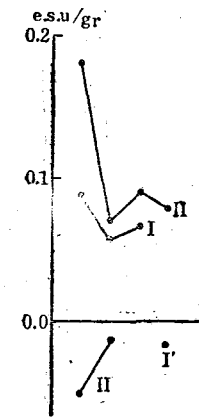
§ 9. 氷の粒の落下實驗

實驗室の冷却管から取つた霜を氷の函に入れ、氷の棒で掻き出し、氷の漏斗を通じて落下させ、それをフラデー管に受けて電氣量を測定する。この際、氷の函、棒、漏斗は皆接地しておいた。又實驗は低溫實驗室本室 ($-25^{\circ}\sim-30^{\circ}\text{C}$) で行つた。

冷却管から採取した許りの霜を 30 cm 程の高さから落下させると、1 gr について、0.05~0.08 e. s. u. の正電氣が現はれる。豫備實驗では 0.1~0.4 e. s. u. の負電氣が出たのであつて、氷の函や漏斗を用ひた結果、電氣の符合が逆になつたと共に電氣量が絶對値に於て少くなつた。符合が逆になつたことは別として、絶對値が少くなつたことは以下に述べるいろいろな實驗の結果を判斷する上に非常に便利である。第 9 圖に I と印した三つの點が、この實驗で得た測定點で

ある。次に一度落下させた氷の粒を、もう一度落下させて、同圖の I' と印した點を得た。即ち僅かではあるが負の電氣になつた。

ここに用ひた霜は冷却管から取つた許りの新しい霜であるから、それが正電氣を持つことは、豫備實驗で見た事と合つてゐる。そして二度目の落下で負電氣が出るのは、霜が暖まつて氷の函や、漏斗と同じ溫度になつた爲と考へれば説明がつく。初めて落下させる氷の粒の場合、落下しつゝある所に、強い電燈の光を當てると、小さい氷片がキラキラ舞ひながら傍の方へ出て來るのが見られる。勿論これはフラデー管に入らない。これは豫備實驗でも見たことであるが、そのときに比べて今度の場合の方が数が遙かに多い。二度目に落下させるときには、この氷の小片の出方は大分少くなる。それ故、初めての落下では正電氣が出、二度目の落下では負電氣



第 9 圖

が出ることは、氷の函や氷の漏斗と氷の粒との間の溫度差の效果に基くのみでなく、氷の粒に含まれる小さい氷片の多寡によるとも考へられる。氷の粒が函の中にある間は、氷の小片は氷の粒に軽く附着してゐたであらう。それが落下の途中で氷の粒から離れるとき、又氷の粒と摩擦するとき、自身は負の電氣を得、氷の粒を正に帶電させたまま傍へ外れて行くと考へれば、この實驗結果が説明される。二度目の落下では小片の数が少いのでその効果が強く現はれない。豫備實驗で氷の小片の数が今の場合より少なかつたのは、溫度の高い低溫實驗室の副室で實驗してゐたか

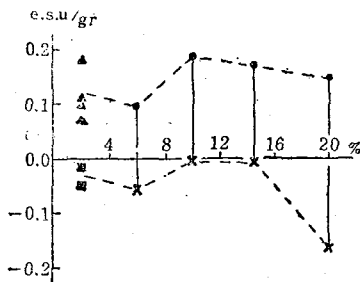
らである。氷は温度が高いと附着し易い。豫備實驗では小片が氷の粒から離れ悪くなくなつてゐたのである。

豫備實驗で知られた通り、氷の粒の落下に際しては、イオンの發生することが考へられる。しかも負イオンの方が正イオンよりも多いのであつて、小片が傍へ外れる位ならイオンも亦外れるであらう。小片が多く含まれて居れば、氷同志の摩擦の機會も多く、イオンの發生も多くなる筈である。それ故、小片はそれ自身の持つ電氣によつてのみならず、イオンの發生をも援けて、上の現象に効果を及ぼしてゐるものと考へられる。

小片をもつとよく取り去る爲に、初めに落下しつづつある氷の粒の流れを團扇であほいだ。すると小片は風に吹き流されてフアラデー管に達しない。その結果第 9 圖で II の四つの點を得た。即ちこの場合は I に比べて少し大きい正電氣を示してゐる。次に同じ氷の粒を再び落下させると同圖の II' の點で表はされる負電氣を得る。小片を含まない氷の粒は、落下の途中で弱い氣流に吹かれてもあまり大きな變化を受けず、函を出て漏斗を通過した時と同じ電氣を持つたままフアラデー管に入るものと見られる。それ故 I', II' に示される値は、氷の粒と氷の函及び漏斗との摩擦によつて氷の粒が得た電氣である。ここに再び形の大きい氷塊と形の小さい氷の粒との摩擦では、氷の粒が負に帯電するといふことを示す事實を得た。

第 9 圖の I, II の正電氣は、氷の粒が氷の漏斗と摩擦して得た負電氣を中和した上で尙現はれたものである。それ故 I, II の値に、I', II' の負電氣と等量の正電氣を加へただけの正電氣量が、小片やイオンが持ち去つた負電氣に對應するものである。

氷の小片の効果を尙一層はつきりさせる爲に、故意に小片を混ぜて見ることを行つた。低温室内で氷の塊を鋸で挽くと、挽き屑として細い氷の粉が得られる。寫眞 No.98 がその挽き屑の顯微鏡寫眞である。落下の途中を團扇であほいで、もとから含まれてゐた氷の小片を取除いておいた氷の粒に、この挽き屑を混じ、それを落下させながら團扇であほいで、氷の粒の持つ電氣を測つた。

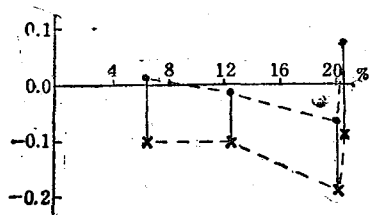


第 10 圖

その結果を第 10 圖に ● 印で示す。横軸は混じた挽き屑即ち小氷片の重量比、縦軸は、氷の粒 1 gr についての電氣量である。× 印の點は、比較の爲に挽き屑を混ぜない前の氷の粒を單に落下させてとつた値である。又氷の挽き屑と、もとから氷の粒に含まれてゐた氷の小片との効果を比較する爲に、第 9 圖の II と II' との點を第 10 圖中の挽き屑の混合比 2% の所に ▲ 印及び ■ 印で書き入れた。ただ便宜上、2% の所に書いたのであつて、もとから

含まれてゐた小片の含量が 2% に當つてゐると云ふ意味ではない。▲ 印が II の點を移したもので、即ち落下の途中をあほいだもの。■ 印が、小片を吹き去つて了つた氷の粒を更に再び落下させた場合の II' の點である。■ 印と × 印とは皆同じ値を示すべきであるのに拘らず、

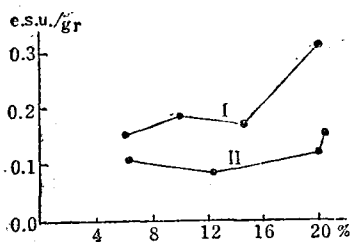
圖に見るやうに、互にかなり大きい偏差を現はしてゐる。採取した霜の性質の差異によるものであらう。併し小片を吹去つた後の霜をよく混合してからその一部、一部をとつて調べて見ると、それについてはこのやうな大きい偏差は見られない。第 10 圖の縦の線で結ばれた相對應する ● 印と × 印とに用ひた霜は、このやうにしてよく混合したものである。それ故ここに現はれた電氣量の差違は、挽き屑を混じてそれを吹き去つたことのみによつて生じたものである。



第 11 圖

第 11 圖も第 10 圖と同じ實驗の結果であるが、第 10 圖の場合と異なるのは、挽き出した氷の粉を直ぐに交ぜないで一時間程放置してから混ぜた點である。第 10 圖の場合には挽き出して直ぐに混ぜたのである。氷の粉が舊くなると互に附着し合つて大きな粒になるし、又昇華の爲に一粒一粒の粉の角が圓くなる。即ち挽き屑の粉の性質は水の小片の性質より、氷の粒の性質に近づいたわけである。

第 11 圖と第 10 圖とを比べて、● 印の點の位置が下つてゐるのは、その爲と考へられる。第 10 圖、第 11 圖に於て、● 印の値から × 印の値を減じたものが、挽き屑やイオンを吹流した爲に現はれた正電氣に當る。これを混じた挽き屑の重量比に對して表はしたのが第 12 圖である。I は第 10 圖、II は第 11 圖のものである。



第 12 圖

挽き屑の量の増すと共に正電氣の量も増してゐるが、その増し方はあまり著しくない。殊に II では殆ど増してゐない。挽き屑の量が一定量より多くなれば、挽き屑は互に附着し合つて離れない場合が多くなり、摩擦の機會が挽き屑の量に比例しては増さない爲と説明される。

先に、氷塊と氷の粒との摩擦では、氷塊が正、氷の粒が負になると述べたが、形の大きい氷塊の方は水から凍つた

氷、形の小さい氷の粒は水蒸氣が昇華して出來た霜であつた。今の場合には形の極めて小さい挽き屑が水から凍つた氷であり、それと摩擦し合ふ形の少し大きい氷の粒の方が昇華で出來た氷である。そして挽き屑は、もとから氷の粒に混じてゐた昇華によつて出來た氷の小片と全く同様な作用をする。即ち、挽き屑は氷の粒との摩擦で負に帶電する。かくして、氷の成因、即ち氷が水から凍つて出來たか或は昇華によつて水蒸氣から直接に出來たかは、摩擦電氣に對して大きい差違を示さないと考へられる。

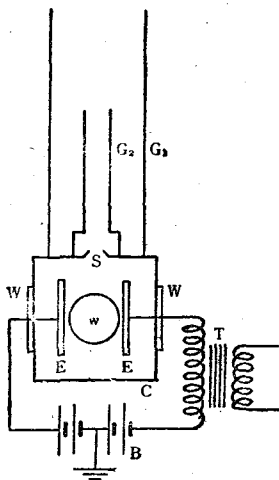
§ 10. 氷の小片の電氣

前節で氷の粒を落下させながら風を當ると、風に吹き飛ばされなかつた氷の粒が 1gr について 0.1~0.2 e. s. u. の正電氣を得ることを知つた。この正電氣に對應する負電氣は、吹流された氷の小片か、或はイオンが持つてゐる筈である。若しイオンが充分多量の負電氣を持つてゐれば小片の方は正電氣を持ち得るのであるが、前節では小片も亦負電氣を持つものと考へた。これ

は豫備實驗 §5 に於て、些小ながらも小片を受皿に取ることが出来てその電気が負であることを知つたことと、氷塊と氷の粒との摩擦では形の小さい氷の粒が負に帯電することから氷の粒よりも更に小さい小片も亦負に帯電するであらうと、想像したことによるのである。併しそれでは甚だ不確實である。それで直接に小片の電気を測ることを行つた。

吹流された小片をフアラデー管に受けてその電気をしらべる方法は、イオンをも同時にフアラデー管に捕へる危険が多いので、小片だけの電気を調べるのには適當でない。又吹流された小片を多量に集めることも困難なので、フアラデー管を用ひたのでは測定系の電気容量が大きくなつて感度に不足する。それで個々の小片の電気を調べる方法をとつた。この方法は古くは Wells, Gerke⁽¹⁾ によつて用ひられ中谷, 寺田⁽²⁾ はそれを改良していろいろな物質の粉の電気を調べた。ここに記す實驗は、中谷, 寺田の使つた装置をその儘利用して、低温實驗室副室で行つたものである。

装置の主要部分は縦横高さ 6 cm の銅製の C 函で、第 13 圖にその構造を示す。函 C の兩側の



第 13 圖

壁によつてエポナイトで絶縁された二つの電極 E E が支へられ、平行に保たれてゐる。この電極に、圖に表はしたやうにして電池 B 及び變壓器 T によつて同時に直流及び交流の電圧をかける。C の兩側の壁には又縦に細長い窓 W W があけてあり、電極 E E にも W に平行な細い隙が切つてある。炭素アークから出る光を集光レンズを通過せしめ W から差込ませると、光は E の細隙を通つて E E の間、函 C の中心に集められる。落下する氷の粒に風を吹きかけると、吹流された氷の小片は C の上面の圓形の孔 S から函の中に入り、函の中心で横から来る強い光に照される。したがつて C の前面にあけた窓 W から見ると、小片は暗視野のなかに光點として認められるのである。小片を観察するには顯微鏡を用ひた。C の上に立つ G₁, G₂ は金屬圓筒で落下

する氷の小片が C に入る前に風に亂されないやうにするために設けたものである。小片が電氣を持つてゐれば、直流電壓によつて生じた定常電場の爲に、電氣の符號に従つて小片の路は鉛直方向から右又は左に外らされる。これによつて電氣の正負が判る。併しこの曲り方から電氣量を出すには困難が伴ふ。電氣量を正確に求める爲には強い電場をかけて小片の路の曲り方を強くすることが必要であるが、顯微鏡の視野は狭いから曲り方がひどいと小片は S から入つても顯微鏡の視野を外れてしまふ。それで直流電場、小片の路が左に外れるか右に外れるかを判断し得るに充分な程度で成る可く弱いものを用ひた。交流電場をかけると小片の落下経路は波形を示し、

(1) P. V. Wells and R. H. Gerke: J. Amer. Chem. Soc. 41 312 (1919).

(2) U. Nakaya and T. Terada: Phil. Mag. 19 115 (1935).

その波長 λ , 振幅 a を知ることによつて小片の落下速度及びその電氣量 e と質量 m との比 $\frac{e}{m}$ を求めることが出来る。交流の周波数を f とすれば、落下速度 V は $f\lambda$ で、 $\frac{e}{m}$ は

$$\frac{e}{m} = 2\pi^2 a \sqrt{\frac{f^2}{2} E_{eff}} \sqrt{1 + \left(\frac{\mu_h}{2\pi f m}\right)^2} \quad (1)$$

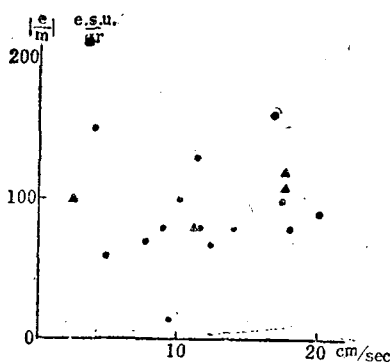
で與へられる。 μ_h は小片の水平方向の運動に對する抵抗係数である。鉛直方向の運動に對する抵抗係数を μ_v とすると、 $mg = \mu_v v = \mu_v \lambda f$ なる關係があるから、これを (1) 式に代入すると、

$$\frac{e}{m} = 2\pi^2 a \sqrt{\frac{f^2}{2} E_{eff}} \sqrt{1 + \left(\frac{g}{2\pi \lambda f^2}\right)^2 \left(\frac{\mu_h}{\mu_v}\right)^2} \quad (2)$$

を得る。電極間の距離は、1.00 cm として、交流電壓には 60 サイクル、有效電壓 $V_{eff} = 2100$ ボルト、直流電壓には 180~360 ボルトを用ひた。小片の落下の路筋は顯微鏡にライカカメラの速寫装置をつけて寫眞にとり、それを 4 倍に引伸ばして、 a 及び λ を測定した。顯微鏡寫眞の原圖は、已に實大の 3 倍になつてゐるから、結局實大の 12 倍の寫眞について測定したわけである。寫眞 No.99 は、このやうにして得た寫眞の 1 例で、電場によつて殆ど影響を受けずに鉛直に落ちる氷の粒の路に雜つて一本の波形の路が見える。これが小片の途である。小片を吹送る風が弱いときは、吹流される小片の数が少く、函のなかになかなか入つて來ないので、この實驗では少し強い風を用ひた。その結果函の中に入る小片の数は増したが、同時に氷の粒のうちの小さいものも吹流されて函の中に入り、それが寫眞に寫つてゐる。小片は寫眞 No.96,97 に示したものであるが、寫眞 No.97 のやうな餘り小さい小片では、光の散亂が弱くてその落下の路筋は寫眞によく撮れない。寫眞 No.96,97 で判る通り、小片の形は簡單でなく、これについて μ_h や μ_v を知ることは困難である。(2) 式の右邊で不明なものは、 $\frac{\mu_h}{\mu_v}$ だけで、これさへ判れば $\frac{e}{m}$ は求められる。

それで μ_h と μ_v とが等しいことはないであらうが、大體相等しいものと考へて $\frac{\mu_h}{\mu_v} = 1$ として $\frac{e}{m}$ を求めた。 $\frac{\mu_h}{\mu_v}$ の 1 からの偏差があつても、落下速度が大で λ が大きいときには $\left(\frac{g}{2\pi \lambda f^2}\right)^2$ が小さくなるのでその偏差が $\frac{e}{m}$ の値に及ぼす影響は小さい。 $\left(\frac{g}{2\pi \lambda f^2}\right)^2$ の値は落下速度 V が 10 cm/sec のとき 0.06 で V が 2.5 cm/sec のとき 1 となる。それ故 V が 10 cm/sec 以上ならば、 $\frac{\mu_h}{\mu_v} = 1$ として計算した $\frac{e}{m}$ の値は略正しいと見做される。併し V が 10 cm/sec 以下の小片に對する $\frac{e}{m}$ の値は相當な誤差を持つものと見なければならぬ。

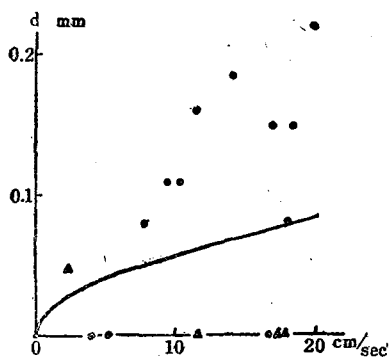
波形を示し、鉛直線から左か右に振れた小片の途は全部で 17 本得られた。そのうち正電氣を持つものは 4、残りの 13 は負電氣を持つてゐた。統計的問題に對してこれでは資料の数が少く、正の小片と負の小片との数の比を決定することは出来ないが、負の小片の方が数が多いと云ふことはたしかである。第 14 圖は小片の落下速度 V と $\frac{e}{m}$ との關係を示すもので、横軸に V



第 14 圖

を cm/sec で、縦軸に $\left| \frac{e}{m} \right|$ を e. s. u./gr でとつてある。●印のものは負電氣、▲印のものは正電氣を持つた小片を表はす。mの大きいもの程大體に於て落下速度は大きいのであるから、横軸は小片の大きさの目安を表はすものと見られる。 $\frac{e}{m}$ の値は小片の大きさによつてあまり變化しない。寫眞 No.99 によく見える通り、小片の途は平行な二本の線として寫つてゐる。これは小片の左右の端が寫つたのであつて、この幅を測れば小片の大きさ d が判る。勿論小片の大き

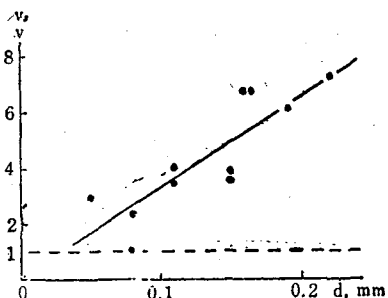
さといつても、形が判らないからその落下の途中に於ける水平方向の長さとも云ふに過ぎない。第



第 15 圖

15 圖は横軸に落下速度 V をとり、縦軸に小片の大きさ d をとつたものである。ピントのぼやけたものは、その途が一本の線になつてゐて、d を定めることが出来ないで、それらは假りに皆大きさを 0 として表はしてある。第 14 圖と同様、●印は負電氣、▲印は正電氣の小片である。曲線は球形の氷の粒子について、その落下速度 V₀ と直径 d との關係を Stokes の式を用ひて計算して求めたものである。d を 0 とした氷の小片は、d が不明なのであるから、これを除外すると、すべ

ての測定點は、曲線よりも上にある。それ故、小片の落下速度 V は、その大きさ d と同じ直径の氷の球の落下速度 V₀ に比べると非常に小さい。同じ d に對する V₀ と V との比を d に對して表はしたものが第 16 圖である。 $\frac{V_0}{V}$ は d と共に大體直線的に増加する。



第 16 圖

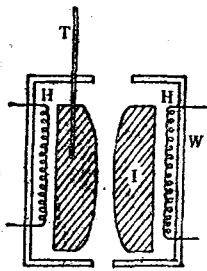
小片の電荷 e を出す爲には m を知らなければならぬが、その方法がない。それで極めて不確實ではあるが、d を直径とする球形の氷の質量を m として見た。d = 0.1 mm とすると $m = 3 \times 10^{-7}$ gr となる。 $\frac{e}{m}$ の値としては第 14 圖によつて 100 をとり、e を求めると 3×10^{-5} e. s. u. となる。中谷、寺田のリコボデウム粉についての研究によると、粉を風で吹いた時粉の一粒一粒が持つ電氣量は、粒が大きい程大きい。併し、正、負の粒

の数には殆ど變りはない。直径 10^{-4} cm で電氣量 10^{-7} e. s. u. 直径 2×10^{-4} cm で 5×10^{-7} e. s. u. である。この割合で電氣量が直径と共に直線的に増加すると直径 10^{-2} cm では電氣量が 5×10^{-5} e. s. u. となり、上に得た 3×10^{-5} e. s. u. と可成り近い。落下する水の粒に風を當てた

場合、吹去られた氷の小片及びイオンによつて運び去られる負電氣の量は、落下させた氷の粒の 1 gr について 0.1 e. s. u. の程度である。これだけの負電氣が全部小片によつて持ち去られるとすれば、その爲に 10^5 個の小片を要することとなる。併し小片の数については、その大いさの程度を出すだけでも困難で、これだけの数があるか否かは全くわからない。それ故ここに小片が負に帯電してゐることと、一つの小片の持つ電氣量の大概の値がわかつたのであるが、小片全體が荷ふ電氣量が不明であるから、イオンの分擔する電氣量は別の方法で求めるより他ない。尙イオンについては、それが存在するか否かをも、もつとはつきり確かめなければならないのであつて、それに就いては、第 III 章で述べる。

§ 11. 温度の異なる氷の粒と氷塊との摩擦

豫備實驗に於て、温度の異なる氷塊と氷の粒とが摩擦すると、温度の高い方が負に、低い方が正に帯電することを述べた。このことを尙確かにする爲に次のやうな實驗を行つた。第 17 圖のやうに、内側に電熱線 H をとりつけた木箱 W のなかに、中央に縦孔を持ち断面が I の形をした四角形の氷塊を入れる。氷塊の大きさは高さ 20 cm, 縦横 13 cm である。電熱線の電流を加減して函の中の温度を、

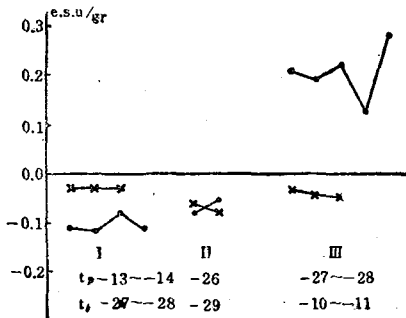


第 17 圖

從つて又氷塊の温度を任意に高めることが出来る。氷塊の温度は氷塊に細い穴を穿ち、それに寒暖計 T を差込んで測つた。室内温度の氷の粒を氷塊の孔に落しこめば、氷の粒は暖い氷塊と接觸摩擦して、孔を抜けて下に落ちるので、それをファラデー管 F に受けて、その電氣を測定する。氷塊の温度の方を氷粒の温度より低くする爲に、液體空氣を用ひて氷塊を冷さうとしたが容易には冷されなかつた。それで、氷塊を室温

のままとし、氷の粒の温度を高めることにした。この實驗は低温實驗本室で行つたのであつて、氷の粒を暖めるには、それを低温實驗室副室に暫く放置しておいた。

氷の粒に小片が混じてゐると現象を複雑化する虞れがあるので、氷の粒には、一度落下させて風によつて小片を吹去つたものを用ひた。測定の結果を第 18 圖に示す。圖中、 t_p とあるのは

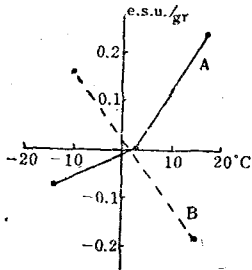


第 18 圖

氷の粒の温度 t_p は氷塊の温度である。×印は氷の粒を氷塊の孔を通さずに、單に落下させた時のもの、●印は氷塊の孔を通じて落したものである。縦軸は、氷の粒 1 gr についての電氣量を e. s. u. でとつてあり、横軸は單に測定回数である。測定を三つの部分に分ち、I, II, III と印してあるが、I, II は氷の粒の方が温かい場合で、温度差は夫々 14°C , 3°C である。III は氷の粒の方が冷たい場合であつて、温度差 17°C であ

る。II の場合は氷塊と摩擦させても、摩擦させないときに比べて電氣量に殆ど變化を見ないが、

I の場合は負電気が増し, III の場合は大きな正電気を示してゐる。即ち氷の粒の方が暖かいときは、氷の粒が負に、冷いときには正に帯電する。氷塊と摩擦した爲に生じた電気は、●印の値から × 印の値を差引いたものであるが、それを温度差に對して書き表はしたのが第 19 圖

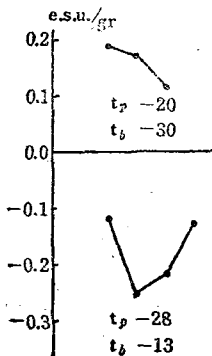


第 19 圖

の A である。温度差としては、 $t_b - t_p$ を横軸の方向にとつてある。

以上は氷の粒の電気だけを測つたのであつて、氷塊の電気も亦測る必要がある。豫備實驗に用ひた第 7 圖の装置を用ひて、氷板に向つて氷の粒を落下させ、氷板に現はれる電気を測定した。この場合には氷板の温度を電熱で高めることがむづかしいので、副室に暫く置いて暖めた氷板を用ひて實驗した。氷板の温度は、氷板に細い孔をあけ、そこに寒暖計を差入れて測つたが、これは氷板の内部の温度で、表面の温度はこれよりも低いであらうが、此處では差込んだ

寒暖計の示す温度をそのまま用ひることとする。第 20 圖が測定結果で、縦軸に氷の板に現は



第 20 圖

れた電気を、衝突した氷の粒の 1 gr について表はしてある。氷板の方が暖かいとき氷板は負に、冷いときは正に帯電する。温度差 $t_b - t_p$ に對して、この電氣量を表はしたのが第 19 圖の B である。第 19 圖の A 及び B から、温度差によつて生ずる電気は、温度差 1°C に對して、略 0.01 e.s.u./gr となる。A について、温度差 3°C のとき生じた電気が 0 になつてゐるが、ここに豫想される 0.03 e.s.u./gr は測定値の誤差の程度のものである。したがつて、實際に測つた結果それが現はれなかつたとしても、測定回数が少い限り矛盾ではない。

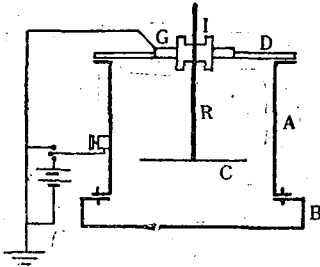
この章に述べた實驗は大體豫備實驗に於て行つたものと同様な方法によつたのであつて、得られた結果も豫備實驗の結果とよく合つてゐる。豫備實驗に比べて、氷の函、氷の搔出し棒などを用ひ、氷と氷以外の物質との摩擦を避けた結果、測定結果の確實性を増すことが出来た。これで温度の異なる氷の摩擦に於ては暖かい方が負に冷い方が正に帯電すること、同温度の氷の摩擦では形の小さい方の氷が負に帯電することは殆ど確められたと見てよいであらう。併し、イオンについては、未だその存在も確かに證明されてゐない。

第 III 章 イオンの存在

前章までの實驗によつて、氷の粒の摩擦の際イオンが発生すると云ふ疑ひが充分に懐かれる。これを確かめる爲に次のやうな實驗を行つた。この實驗は低温實驗室本室 ($-25^\circ\text{C} \sim -30^\circ\text{C}$) で行はれたものである。

§ 12. 實驗方法

第 21 圖に示すやうな角型の銅製の函を作る。A は高さ 9 cm, 縦横 11 cm の筒で、高さ 25 cm, 縦横 15 cm の平たい函 B に捻子によつて結ばれて

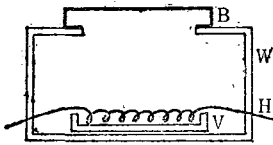


第 21 圖

ゐる。D はエポナイトの蓋で、中央部に接地された金屬製保護輪 G を介してアンブロイド絶緣子 I を支へてゐる。尙エポナイト蓋の表面は、上面下面共に、A と接觸する端の方だけを残して接地した錫箔で被つてある。R は絶緣子を貫く金屬棒で、その上端は清水式電位計につながれ、下端には薄い銅板の電板を附ける。全装置は内側をトタン張りに

した大きな木の箱の中に入れ、外部からの電氣的擾亂を防いだ。電位計の感度としては、1 ボルトが 10~30 目盛に當る程度のものを選んだ。

先づ B の内面に霜をつける。第 22 圖に示すやうに、木製の函の底に寫眞用バット V を置



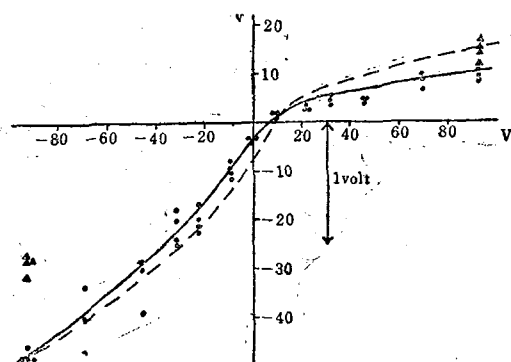
第 22 圖

き、水を入れて電熱によつて暖め、函の中の空氣に水蒸氣を供給する。木函の蓋には丁度 B の口と同じ大きさの孔をあけておき、そこに B を逆さにして伏せる。かうして低温實驗室内にて一晝夜放置すると、B の内面及び木函の内面に長さ 1 cm 程の霜がつく。この霜の形は、水溫即ち電熱線 H に通ずる電流を加減して

いろいろな種類のものにする事が出来る。B の内面の霜を軽く拂ふと霜は根元の 2~3 mm を残して離れる。この霜の根元は非常に丈夫に B の内面に附いてゐて、取去るのが困難な程である。このやうに内面全體に丈夫な霜をつけた B のなかに、新たに木函の内面から搔き取つた霜、又は低温實驗室の冷却管から搔き取つた霜を入れて、第 21 圖のやうに装置を組立てる。装置全體は木製の軌道の上のせてあつて、手を以て前後に往復運動をさせる事が出来る。往復運動を激しく行へば、B の中の霜は前後に動揺し互に衝突して、摩擦が行はれる。B の内面には霜がついてゐるから、自由な霜と金屬の間には決して摩擦は起らない。即ち、ここに何か現象が起るとすれば、霜の間の衝突のみによつて生ずるものであつて、異物質間の接觸によるものは、全く含まれないのである。

R の上端を電位計につなぎ、A, B は接地して装置を數十回動揺すると、電位計は負電氣を示すやうになる。又、A, B に豫め數十ボルトの負電氣をかけておけば、現はれる負電氣は大となり、A, B にかける電氣を正にしておけば現はれる電氣は正である。B の中に霜を入れずに動揺させれば、電位計には何の變化も現はれない。第 23 圖は 100 回の動揺について、電位計に現はれる電位 v と、A, B に與へておいた電位 V との關係を示すものである。横軸に V をボルトで表はし、縦軸に v を電位計の目盛で示してある。電位計の 25 目盛が 1 ボルトに相當してをり、C, R 及び電位計を含む測定系の電氣容量は、18 cm である。始め、 V を -93 ボルトにして測定し、圖の左下隅の四つの ● 印によつて示された測定點、即ち v の値として、46~

48 の値を得た。次いで V を $+92$ ボルトとし圖の右上隅にある三つの \blacktriangle 印の測定點を得た。次に V を -70 ボルトとしそれより次第に -46 ボルト, -32 ボルトと變へて行つて, $V=0$

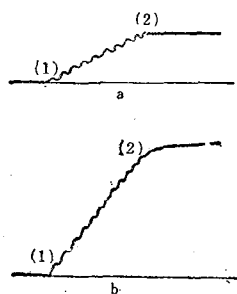


第 23 圖

を通過して, V を正にとり, それを増して $V=+93$ ボルトに到つた。この時の $+93$ ボルトで得た v の値は, 先に得た \blacktriangle 印で表はされる値に比べると可成り小さい。それで, V を再び -93 ボルトにして, 測定を行つたら, 圖の左端に示されたやうな \blacktriangle 印の四つの値を得た。これも亦, 始めに測定した -93 ボルトの値即ち \bullet 印に比べると可成り小さい。つまり氷の霜の動搖をつづけて行くうちに, 電位計に現はれる電位 v は V を一定にしておいても, 次第に小さくなつて行くのである。この影響がなかつたとした場合を考へて, その時の V と v との關係を示したのが第 23 圖の破線の曲線である。

菟電板 C と霜との間の距離は, 4 cm 程で, 激しく動搖しても, 霜が C に接觸することはない。A から上の部分を取外して B のみを動搖させ, 強い光を横から當てて見ると, B の上 2~3 cm の高さにキラキラ浮游する氷の小片が見られる。併し, その數は極めて少い。動搖をとめると 1 sec 位のうちに下に落ちてしまふ。その落下速度から見て, 前節に見た氷の小片と同じものと考へられる。大粒の霜は決して, 飛上ることはない。この實驗の最初の階梯では, A の下面に直ちに底をつけ, B の部分のないものを用ひたのであるが, その際には A の前後の壁に衝突して, 飛上る大粒の霜が見られた。菟電板 C に不凍油を塗つておくと, C に接觸した氷の粒は, そこに附着して了ふ。B 部分のない函を用ひた時には, C にかなり大きな霜の附着するのを見たのである。併し B 部分を取り付けてからは全くそのやうなことはなくなつた。動搖の際壁に衝き當つて上の方へ跳ねても, すぐ上に差出された天井に妨げられて了ふからである。

V を 0 にして, 菟電板 C と函 A, B との間に電位差が存在しない時に C に電氣が現はれる



第 24 圖

ことは, 動搖の際霜の粒が互に衝突して摩擦, 破壊し合ふときに軽い帯電粒子, 即ちイオンが發生し, 弱い風によつてその一部分が上方に運ばれて C に附着することを示してゐる。装置を動搖する時に, 電位計の針の動く有様は, 第 24 圖に示すやうである。(a) は $V=0$ にしたとき, (b) は $V \neq 0$ のときであつて, (1) の點で, 動搖を始め, (2) の點で, 動搖を終つたのである。 $V=0$ の場合, 動搖を始めると直ちに電位計の針も動き出し, 實驗装置全體の多少の振動の爲に, 僅かな増減を示しながら直線的に指度が昇つて行く。装置の動搖を止

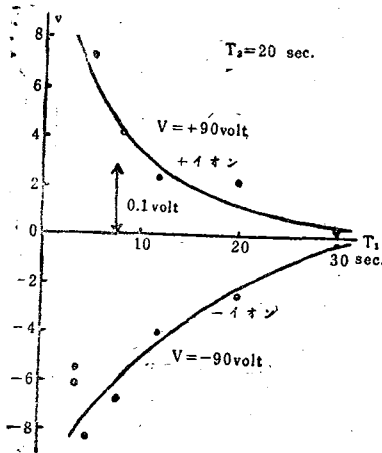
めると針の動きも直ちに上る。動搖の開始と共に直ちに C の電位の變化が始まることは、イオンが擴散によつて C に達するものでなく、風によつて運ばれることを示してゐる。霜の粒は函 B の底の上を前後にすれるのであるから、函の運動に對して霜の運動はおくれる。したがつて風の發生は當然豫期されるところである。又霜の摩擦の爲に生ずる熱の爲に弱い對流の起ることも考へられる。圖 (b) は、 $V \neq 0$ の場合であるが、電位計の指度の變化は、 $V = 0$ の場合に比べて速い。電場によつてイオンの運動が促進されるからである。尙この場合は動搖を止めても尙、數秒の間は指度が昇り續ける。このことは發生するイオンの中に、運動度の小さいものが相當量含まれてゐることを示すものである。

先に述べた通り、装置の動搖と共に 0.1 mm 程度の氷の小片が舞ひ上るが、動搖を止めた後、蒐電板をとり外し顯微鏡で調べると、塗つた油の膜の所々にこの小片の捕へられてゐるのを見る。併しその數は少ないのであつて、多い場合で 20 個か 30 個、大抵の場合は數個を數へるにすぎない。これらの小片が全部同じ符號の電気を持つてゐるとしても、前章の § 9 で小片の電氣量について得た數値によつて判斷されるやうに、その全電氣量は、たかだか、 10^{-8} e. s. u. の程度である。それに対して、C に達する全電氣量は、 10^{-1} e. s. u. の程度のものであるから、この電氣量を運搬するものはイオンであると考へてよい。併し、尙、この點を確かめるために、次節に述べる實驗を行つた。

§ 13. イオン存在の證明

前章の § 9 で調べた氷の小片の落下速度は、速いもので 20 cm/sec、遅いもので 5 cm/sec である。これは蒐電板 C と、霜の表面との距離 4 cm を 1 sec 以内に落下する。それ故この程度の氷の小片の効果を去除するためには、これだけの時間を待つて、それらを沈下させて去除してよければよい。もつと小さい小片の影響をも避ける爲にはこの待つ時間を長くする。その後尙、蒐電板と霜との間の空氣が電導性を持つことが示されるならば、イオンの存在を證明したことになる。

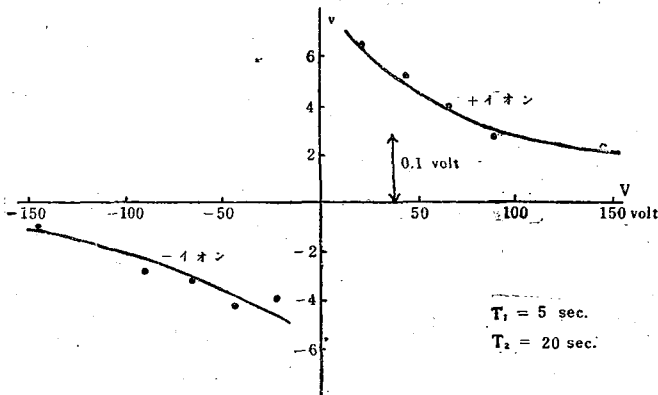
前節の實驗では蒐電板 C と函 A, B との間に初めから V なる電位差を與へておいて其の電場内で摩擦させたのであるが、今度は函 A, B 及び蒐電板を接地して装置を動搖させ、動搖をとめたのち一定の時間 τ_1 をおいて蒐電板の接地を切り、或る時間 τ_2 の間 A, B に電位 V をかける。 τ_1 が充分長ければ氷の小片は沈下し了つてゐる。それ故電位 V をかけたとき、蒐電板に電氣が現はれば、その時まで、イオンが残つてゐたこと、即ちイオンが存在することが證明される。實際の測定に當つては、電位 V をかける時電位計の電場用の電極は兩方共に接地する。A 及び B に與へられた電位 V によつて、蒐電板 C に誘發される電位の爲、電位計の針が大きく振れすぎて電位計を使用不能の状態に陥らせる危険があるからである。 τ_2 なる時間を経たとき、再び V を 0 にして電位計の電場を入れる。この時電位計が或る電位を示せば、C に電氣が與へられてゐたわけである。測定の結果、 V を正にしたとき、電位計は正電位を示し、 V を負にしたときは負電位を示した。第 25 圖は 100 回の動搖を行つて得た測定値で、電位計に



第 25 圖

のイオンが存在することを示してゐる。

今のやうな場合、イオンが存在するとしても、イオンは同一の運動度を持つもののみからなるのではなく、いろいろな運動度のイオンが混合してゐると豫想しなければならない。このことは Chapman⁽¹⁾ の水を噴霧した場合に出来るイオンの運動度の研究の結果によつても當然考へられることである。イオンが異れば、運動度と共に再結合の速度、擴散速度なども違ふので、混合イオンについて得られた第 25 圖の曲線から、例へば結合係數などを出しても到底正しい値を豫期することは出来ない。それにイオンの發生量は、この曲線の各測定點に對して、同一ではないのである。次節で詳しく述べるやうに、又第 23 圖の説明に於ても觸れたやうに、動搖をつづけて行くうちにイオンの發生量は次第に減じて来る。第 25 圖の測定は、 τ_1 の小さい値から、次第に大きい値に向つて進んで行つたので、 τ_1 の大きい測定値は、 τ_1 の小さい測定値に比べて小さ



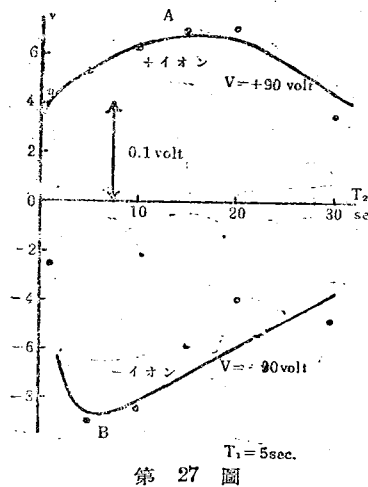
第 26 圖

すぎる値を示してゐるのである。

第 26 圖は裝置の動搖を止めた後 5 sec 経つてから 20 sec 間、函 A, B にいろいろな値の電位 V を與へた場合の v を示す。 V は正負兩方をとつたが、正負何れの場合も先づ 90 ボルトにして、▲ 印の測定點を得た。第二回目には $V=22$ ボルトの測定點をとり、順次大きい電

(1) S. Chapman: Phys. Rev., 52 184 (1937), 54 520, 528 (1938).

位に對する測定點をとつて行つたのであるが、電位を大きくすると共に、 v は小さくなつて行く。初めから五回目に再び $V=90$ ボルトにしたら最初の値の半分以下に落ちてゐた。これによつて、先にも述べた通り、氷の粒は衝突し合ふにつれて、次第にイオン發生の能力を失ふことが知られる。イオン發生量が減ると共に、發生するイオンの性質の變化することも考へられる。このことを霜の粒の老化と呼ぶことにする。動搖を止めた後 5 sec たつてから 90 ボルトの電位を函 A、B にかけ、この電位をかけておく時間 τ_2 を變化させたのが第 27 圖である。測定點のとり方は、

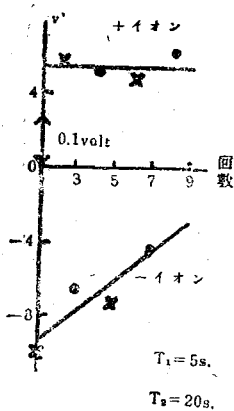


第 27 圖

τ_2 の小さい値から大きい値に向つてゐる。第 25, 26 圖では、函に與へた電位 V の正負によつて v が正負になる以外は、曲線の形に正負による著しい差異が認められないが、第 27 圖に於ては大きな違ひがある。兩方の場合共 2~3 sec で v は大きな値に達するが、それ以後正の場合には餘り値が減らないの對して、負の場合は速かに減じて行く。イオンの運動度が大きければ、短い τ_2 内でイオンは電板 C に蒐められる。それで若し實驗の順序によつてイオンの發生量に變化がなければ、測定曲線は、全部のイオンが電板にとられてしまふのに必要な比較的短い τ_2 以後は横軸に平行な直線となる筈である。併し動搖を

つゞけると共に、老化の爲イオン發生量が減るので、測定順序と共に曲線は下る筈であつて、負イオンの場合は丁度これに當つてゐる。それに反して正イオンの場合は、曲線の下り方が少い。このことは正イオンの發生に對しては、老化の現象が負イオンに於ける程著しくないと考へるのが穩當であらう。併し正の場合であつても、曲線は始め急に昇つて、2~3 sec で大きな値に達してゐるので、運動度の大きいイオンが大部分を占めることは明かである。90 ボルトの電位差で 4 cm の距離を 2~3 sec の間に運動するイオンの運動度は大體、 $0.1 \text{ cm} \cdot \text{sec} / \text{volt} \cdot \text{cm}$ である。この程度の正負イオン及び、それよりも移動度の大きいイオンが大部分をなしてゐることになる。

以上、第 25, 26, 27 圖に示した測定に於て、第 27 圖の $\tau_2=10 \text{ sec}$ 近邊では負イオンが著しく多いことが見られる。その他の場合には正、負のイオンの量には大して差がないが、一般には負イオンが少しばかり多い。唯第 26 圖の實驗では正イオンの方が却つて少し多いのであるが、この種の實驗では、同一と見做される條件の下に測定を行つても、いつも同一の結果が出ることは望めない。第 25, 26, 27 圖では正と負との場合について、用ひる氷の粒を新たにしてある。同じやうな場所から採つた霜と雖も、二つの場合全く同じ性質の霜が採れたとは云ひ難い。したがつて上記の三つの圖の場合について、正負イオンの量の差をそのまま比較することは多少無理である。それで次に同じ氷の粒を用ひて函 A、B に與へる電位 V を交互に正負に變へて測定



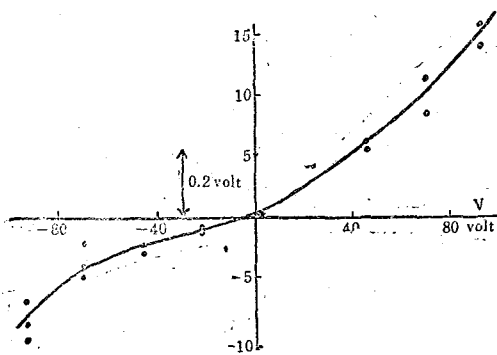
第 28 圖

した。第 28 圖がその結果である。100 回動揺した後 5 sec 経つてから、 V を 20 sec かけたのであるが、 V には 90 ボルトと 190 ボルトとを用ひてある。最初の動揺の後 -190 ボルトをかけ次の動揺の後 $+190$ ボルトをかけた。第三回目の動揺の後には -90 ボルト、以下 $+90$ 、 -190 、 $+190$ 、 -90 、 $+90$ ボルトにして測定したのであつて、圖の横軸は測定の順序を表はすものである。×印は ± 190 ボルト、●印は ± 90 ボルトの V を用ひたことを示す。90 ボルトと 190 ボルトとを用ひたのは今までに最もよく使つた 90 ボルトに於て、已にイオン電流が飽和電流になつてゐるか否かを見る爲である。90 ボルトの場合も 190 ボルトの場合も測定點が同じ曲線上に乗つてゐるので、イオン電流

は 90 ボルトで已に飽和してゐたことが示される。この測定に於て、正の場合は曲線が略水平であるのに対して、負の場合の曲線は著しく傾斜して老化の現象を強く示してゐる。測定順序の初めの方では負イオンの方が正イオンより遙かに量が多いが、後には略兩方共同じ位になりむしろ負イオンの方が少くなる。即ち未だ動揺を受けてゐない新しい霜が衝突して摩擦するとき、負イオンの方が澤山に發生し長い間動揺を受けて老化した霜の衝突摩擦に於ては僅かではあるが正イオンの方が餘計に出来るのである。前章及び前前章の氷の粒の落下實驗に於ては、氷粒が衝突し合ふ回数は少ない。即ち動揺の初期に於ける状態に似てゐるわけである。したがつて負イオンの發生量の方が正イオンの發生量よりも多いと云ふ豫想が、今の測定結果と一致したことになる。

§ 14. 動揺中に發生するイオン

圖 A, B に電位 V をかけたまま動揺した場合、蒐電板 C に現はれる電位 v と V との関係は已に第 23 圖に示してある。前 § の方法では、イオンが發生してから暫く時間が経つてから蒐電されたが、動揺中に蒐電すれば發生したばかりのイオンを捕へ得る。動揺中には氷の小片が多少舞上るので、それによつて運ばれる電氣が蒐電板に與へられる危険があるが、§11 で見たやうにそれはあるとしても極めて少い筈である。殊にもはやイオンの存在が確立された上は動揺

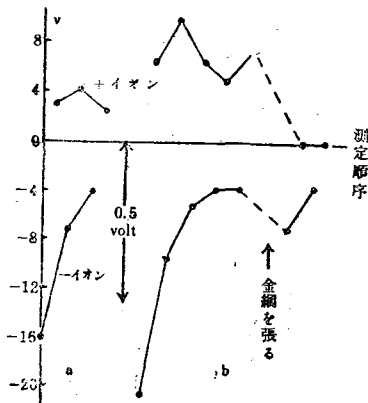


第 29 圖

中に蒐電板に現はれる電氣は確かにイオンによつて運ばれるものと考へてよい。注意すべきは、 V を 0 にしても蒐電板に負電氣が現はれることである。このことは数回の實驗によつて確かめられた。唯一度第 29 圖に示すやうに、 $V=0$ のときに僅かではあるが正電氣が現はれた場合があつた。前 § の結果では氷の粒が新しいうちは負イオンの發生量の方が正イオンの發生量よりも可成り多く、氷

の粒が老化すると正イオンの方がかへつて多くなることもある。第 29 圖では、 V を交互に正負に變へながら、 $|V|$ の大きい値から小さい値への順に測定したのである。即ち、 $V=0$ の測定は老化した氷の粒について行はれたのであつた。

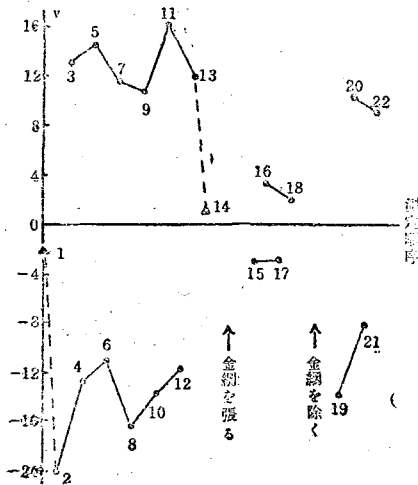
第 23, 29 圖のやうな測定は老化の現象に妨げられて正しい判断を下すのに適當してゐないので、老化の現象そのものを調べて見た。第 30 圖 a, b は冷却管からとつた霜 15 gr を用ひて、



第 30 圖

交互に正負の 90 ボルトを函に與へて 100 回の振動についてとつた値である。横軸に測定の順序、縦軸に v を電位計の目盛で表はしてある。老化の現象は、負電位の場合に著しく、正電位の時には殆ど認められない。函に電位を與へておくと霜の粒は電場のある所で衝突し合ふことになりイオン發生に電場の直接効果があるかも知れない。それで第 30 圖の b の測定に於ては、第 9 回目の動揺と第 10 回目の動揺との間で、函 A と函 B との接目の所にはさんで、0.5 mm の孔の真鍮の網を張つた。かくすれば霜は上の方を金網で被はれた結果、上下四方共同じ電位の導體

に包まれ、電場のない所で衝突し合ふことになる。この結果 V が正の場合は v が全く現はれなくなつたが、負の場合には尙相當の電位が現はれた。併しこの場合電板のイオンを蒐める能力は金網の爲に大部妨げられる筈であるから、 v が 0 になること、或は v の値が小さくなることは、イオン發生量が減少したと云ふことを意味するものではない。むしろ第 23, 29 圖の $V=0$ に於て尙 v が現はれることと共に、電場が 0 になつても尙イオンが發生することを示すことがらとなる。又この金網を張ると、氷の小片は金網に妨げられて電板に全然達しない。即ち



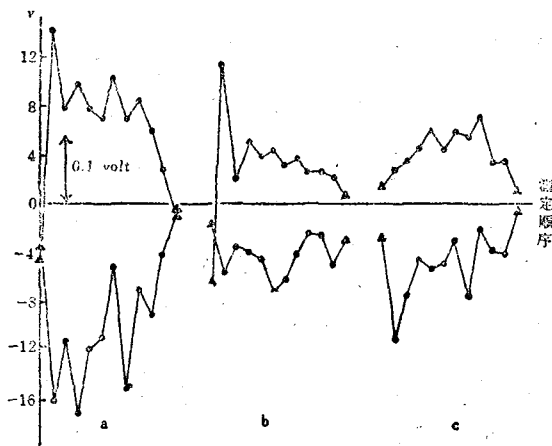
第 31 圖

v がイオンによつて選ばれる電氣によつて生ずることを示す今一つの證據となる。第 31 圖は第 30 圖と同様な條件の下に行つた他の一系の測定結果であるが、このときは金網を張つても、正負共同程度の v が出た。そして再び金網を外すと舊の値に戻るのである。この圖に於て第 1 回目と第 14 回目の動揺、即ち ▲ 印で表はした點は、 $V=0$ で行つたものである。第 1 回目では v が負第 14 回目では v が正であることは霜の粒の老化が進むと共に、正イオンの發生量の方が多くなることを示す今一つの例である。

第 31 圖に於ては、第 30 圖と比べて、 V を負にしたときの老化曲線が異なるやうに見えるが、これは V

$V=0$ で行つた第一回目の動搖がある爲である。即ち電位をかけて測定を行ふ前に、已に動搖を與へてゐたので老化がある程度進んでゐたからである。第 31 圖で第 8 回目の動搖に於て現はれる電氣が、その前の第 6 回目の動搖に於ける電氣に比べて著しく多くなつてゐるのが目立つ。函の中に霜を入れて放置しておくと、しばしば霜は互に附着し合つて動搖しても動かなくなる。そのやうなときは、函に強い衝撃を與へて霜の結合を除くのであるが、その直後に於ける動搖では常に現はれる電氣量が多くなる。この第 31 圖の第 8 回目の測定の値はその一例である。一度結合したものを衝撃によつて離れ離れにすれば、細い粒が出来たり結晶に鋭い角が出来る。これらの鋭い角は霜の衝突の際壊れ易い。又第 30 圖、31 圖に見る通り、霜が新しく結晶の角が鋭い場合に於て老化の現象が著しい。これらのことから、函を動搖させた場合發生するイオンは、霜の粒の摩擦によつて生ずると考へるよりも、衝突に際して霜が破壊するときに發生するものであらうと云ふ疑ひが濃くなる。次章に述べるやうに、實際霜が破壊する時イオンが發生することを示すやうな事實が存在するのである。

第 30、31 圖に用ひた霜は何れも、冷却管からとつた霜で、形としては肉厚であつて函を動搖させた時動き易い。これに反して第 22 圖の木函を用ひて作つた霜は肉が薄かつたり又は細長い形をしてゐて、放置して置くと結合し易く、函を動搖させても動き悪く、したがつて霜同志の衝突も激しくは行はれず、發生するイオンの量も少ないのである。第 32 圖の (a) (b) (c) は何れも木函で作つた霜についての老化曲線で、(a) は平板型、(b) は針狀、(c) は樹枝狀の霜のものである。その中樹枝狀の霜を寫眞 No.100 に示した。(a) (b) (c) 圖共に一測定點についての動搖は 100 回で、 V は正負共に 90 ボルトである。尚同じ型の霜について、正負は別々に新しい霜を用ひたのであつて、同一の霜に正負の V を交互に與へたものではない。第 1 回目及び最後の動搖では V を 0 にしてあ

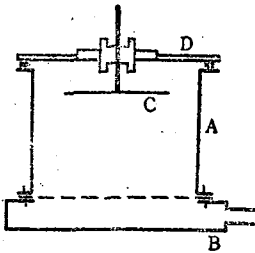


第 32 圖

る。霜が互に附着し易い爲に測定點は可成り散亂してゐるが、老化の現象は認められる。霜の形の差異は餘り認められないが、(a) の平板型が一番多くイオンを出してゐる。(c) の正の場合を除いては全部について第 1 回の $V=0$ での動搖で v が負になつてゐる。最後の $V=0$ での動搖でも、 v が負の場合の方が多い。

霜が未だ老化せず新しい間は、 $V=0$ に於ける動搖で電板に負電氣が現はれる。これによつて負イオンの量の方が多いと云ふことが殆ど確立されたのであるが、このことは重要な點であるから、尙確かな結果を得る爲に次のやうなことを行つた。 $V=0$ に於ける動搖で、イオンが電

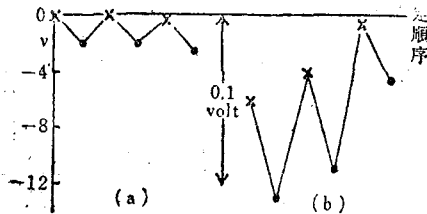
板に到達するとしても、それは主として函の中に起る弱い風の爲である。それ故この風を強くすればイオンが蒐電板に接觸する機會は多くなり、蒐電板に現はれる負電氣の量は増加しなければならない。第 21 圖の函 B の一側面に孔をあけて風を送り込む口とし、A と B との境に金網を張つて、A の内面及び金網の上面に霜をつけた。(第 33 圖) エポナイトの蓋と A との間に



第 33 圖

は隙間を作つて風の出口となし、蒐電板 C は上方に移して、金網と C との距離を 6 cm に遠ざけた。金網の上に霜をのせ、動搖させながら、B の孔から竈で風を送る。風は金網を抜け動搖する霜の間を通り、上端の隙間から逃げる。この場合霜が動搖して、前後の壁に衝突し大きな霜が跳上つて蒐電板に觸れる危険が考へられる。併し蒐電板を高く引離し、A の内面の霜にも丈夫で長いものを附着させて、それを B の差出し天井の代りを勤めさせた結果、この

危険を防ぐことが出来た。動搖も亦餘り激しく行はれなかつたので、油を塗つた蒐電板には大きい霜は勿論、氷の小片もつかなかつた。併し蒐電板が霜から遠い爲に、蒐電板に集められる電氣が少くなり、電位計の感度を高める必要を生じた。第 34 圖が測定結果である。(a) は木函で作



第 34 圖

つた樹枝状の霜を用ひた場合で、x 印は風を送らなかつた場合、● 印は風を送つた場合のものである。縦軸は v 、横軸は測定の順序を表はす。圖に明かな通り、風を送ると負電氣は著しく増す。(b) は樹枝状霜の代りに、冷却管からとつた霜を用ひた場合である。x 印、● 印の點の意味は (a) の場合と同様であつて、風を送つたとき負電氣の増加は著

しい。又動搖を重ねると共に老化の現象が現はれて来る。

以上の事により、霜の粒が衝突し合ふ時、正負のイオンが発生することが確かめられた。一般に負イオンの方が量に於て多く、霜が新しい場合には正負イオンの量の差が殊に著しい。尙動搖する霜の量と、發生するイオンの量との關係を調べた結果は次のやうである。冷却管からとつた霜の 20 gr, 40 gr を用ひて、第 21 圖の裝置により、90 ボルトの V を用ひて測定を行つた。老化の効果を除く爲にあらかじめ數百回の豫備的動搖を與へてから、同じ動搖回数に對する、20 gr と 40 gr との場合の電氣量を比較した。常に 40 gr の霜を用ひた場合の方が電氣量は多く、二つの場合の比は、 V の正負について各三回行つた測定によると、第 1 表の値となつた。これ

から大體發生するイオンの量は用ひた霜の量に比例すると云ふことが出来る。

第 1 表

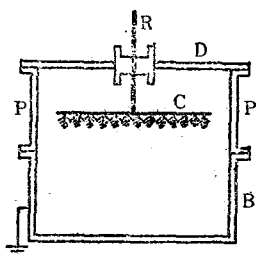
$V > 0$	2.4	2.6	1.2
$V < 0$	1.6	2.0	2.1

第 IV 章 氷粒の破壊によつて生ずる電氣

今までの實驗は皆氷の粒を衝突させて發生する電氣を調べたのである。衝突の際に、氷の粒は摩擦すると同時に破壊もされる。Bowden¹⁾の實驗によつて、金屬の摩擦に於ては、特別な滑油を用ひない限り、摩擦面の融着破壊と細い滑りとは繰返されて起つてゐることが明かになつた。それ故摩擦と云つてもそこには摩擦面の破壊がある。氷についても同じことが行はれてゐるか否かは不明であるが、ここに出来るだけ摩擦を伴はない破壊に於て電氣が現はれるか否かを調べることは必要である。その爲に次の實驗を行つた。

§ 15. 測定方法

(a) 眞鍮製の函 B (第 35 圖) に眞鍮製の柱 PP を立て、それによつて第 21 圖に用ひた

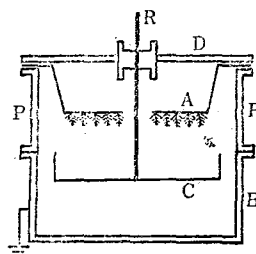


第 35 圖

蓋 D を支へる。棒 R の下端には下面に霜をつけた四角形の銅板 C をとりつけ、棒の上端は電位計へ導く。函 B は第 III 章の實驗に用ひた木の線路の上に乗せる。滑らせて前方にある止めにつきあてると、C についてゐた霜は、その衝撃によつて落下する。落ちた霜を見ると皆その根元の所で切れてゐる。それ故霜が落ちるときには、摩擦は殆んど伴はず、大體純粹の破壊が起つたと見ることが出来る。C には負電氣が現はれるが、これは破壊によつて霜の根元

が得た電氣である。

(b) (a) の實驗では霜の残された根元の方が持つに到る電氣を知り得るが、落下した霜の主體の方の電氣がそれと反對の符號の電氣を採つてゐるか否かを調べる必要がある。第 36 圖に於て、A は中心に圓形の孔を持つ銅板で、それから出た腕を P と D との間に狭んである。従



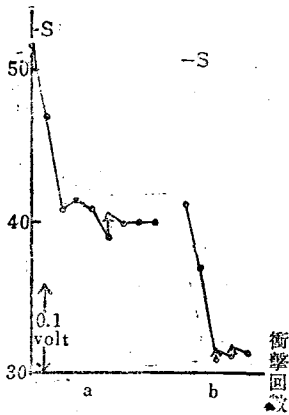
第 36 圖

つて、A は接地されてゐる。A の下面に霜をつけ、それが落ちたとき、A の孔を貫いてゐる棒 B の下端の C に受けられるやうにしてある。これによつて落下した霜の電氣を知り得るが、それは豫期した如く正電氣であつた。

§ 16. 測定結果

(a) の方法によるもの。15 mm 位の長さの樹枝狀の霜を C につけ、霜の落下の爲に生ずる電位計の指度の變化を示したのが第 37 圖 (a) である。横軸に衝撃の回数、縦軸に電位計の指度をとつてある。以下すべて電位計の指度は、S と印した點を 0 電位として、上向きは正、下向きは負の電位を表はしてある。2 回の

(1) F. P. Bowden and L. Leben: Proc. Roy. Soc. London (A) 371 (1939).

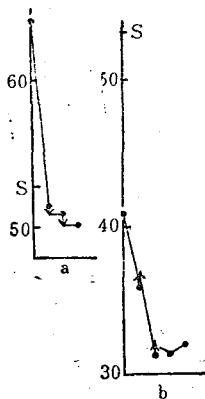


第 37 圖

衝撃によつて殆ど全部の霜が落ちて、この間に大きな負電位を示した。第 3 回目の衝撃からは、餘り負電位は増してゐない。落ちた霜の数は、全部で 40 箇で、その全質量は 0.67 gr であつた。C に残された霜の根元の長さは 2~3 mm で、幅は約 0.5 mm、厚さ 0.05 mm 位であるから、その断面積は略 0.03 mm² である。従つて 40 箇の霜については破壊面の面積は 1 mm² の程度となる。C と電位計とを含む系の静電容量を用ひて現はれた負電氣量を計算すると 10⁻² e. s. u. となる。丁度 1 cm² の破壊面について 1 e. s. u. の電氣が現はれたことになる。

C に霜をつけるのには一晝夜を要するので、繰返してこの測定を行ふことは不便である。それで霜を落して了つた C を取外して、霜のついてゐた方の面を上にして置き、その上に別の霜を撒き散して電燈を近づけて少し暖める。すると撒かれた霜は C に附着して、逆さにしても落ちないやうになる。これを再び舊のやうに取付けて、衝撃を加へて落すと、前と同様な結果が得られる。第 37 圖の (b) がその一例である。

第 38 圖は、針狀の霜を用ひた時の結果で、記號の意味など、第 37 圖と同じである。第 37

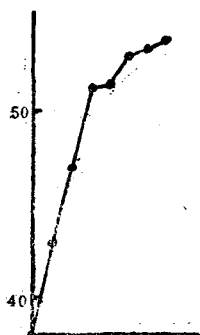


第 38 圖

圖の (a) (b) 及び第 38 圖の (b) の測定に於ては、衝撃を與へて電位計の指度が變化したのち、暫くの間、すべてが靜止してゐるにも拘らず電位が徐々に少しく正の方へずれることがあつた。それを圖には短い矢印で表はしてある。それと共に第 38 圖 (a) では衝撃後負の方へ少しずれてゐる。前の三つの場合では、衝撃を與へた後、C は負電位になつてゐるのであるが、第 37 圖 (a) では最初 C に正電氣を與へておいたので、衝撃後 C の電位は殆ど 0 電位になつてゐる。この衝撃後の電位の小さいずれは、氷の破壊と共に正負のイオンが發生し、而も負イオンの方が多いと云ふことによつて説明出来る。即ち、第 37 圖及び第 38

圖 (b) の場合は、C が負電位にある爲、正イオンが C に引寄せられてそれに附着し、C の持つてゐた負電氣の一部を中和する。又第 38 圖に於ては C が殆ど 0 電位に近いので、量の多い負イオンが C に附着して、その負電荷を増加せしめたと考へるのである。

(b) の方法による實驗。第 39 圖が落下した霜の帶電によつて生じた電位計の指度の變化であつて、霜が正電氣を持つてゐたことが示されてゐる。その量も略 (a) の方法で得た負電氣と同程度である。以上 (a), (b) 二つの實驗により、氷の結晶の破壊によつて破壊されて二つになつた兩方の氷片に正負反對の電氣が現はれることが明かとなつた。そして、その二つの氷片のうち、大きい方が正に、小さい方が負になつて前に得た結果とよく合つてゐる。ただ兩方の氷片の

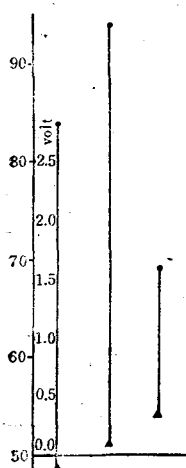


第 39 圖

電気を同時には測つてゐないので、各々に現はれる正負の電気が等量か否かは不明である。イオンが出來て、負イオンの方が正イオンより多いとすれば、大きい氷片に現はれる正電気の方が量に於て優つてゐる筈である。

§ 17. 温度差の影響

§16 (a) の装置(第 35 圖)で、C の上面に液體空氣を吹きつけて C を冷すと霜の根元は冷え、霜の根元から先端へかけて温度の上り勾配が出来る。このやうにしてから霜を破壊すると C に正電気が現はれ、前節 (a) の場合と符號が逆になる。温度勾配がどの程度のものか分らないが、發生する正電氣量は大である。電位計は一度の衝撃で非常に大きく振れ、次の衝撃ではスケールアウトする。それで各衝撃の後電位計を接地して、その電位を 0 に引き戻さなければならなかつた。第 40 圖がかうして得た測定結果の一部である。三角印が衝撃前の電位計の指度、それと直線で結ばれた上方の圓印が衝撃後の指度である。霜は樹枝状のもので、一回の衝撃で落ちた霜の質量は略 0.2 gr であつた。



第 40 圖

先に暖かい氷と冷たい氷とが衝突すると、冷たい方が正に、暖かい方が負に帯電すると云ふ結果を得てゐる。今の場合は豫め温度勾配のあつた所で氷が破壊して切れて、同じく冷たい側が正に、暖かい側が負に帯電した。この二つの場合は、根本的には同じ現象と考へられる。

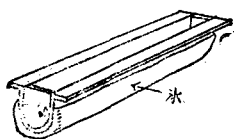
第 V 章 氷 の 摩 擦

前章の初めに述べた通り、摩擦も亦破壊と同じ現象であるかも知れない。そして氷の破壊に於て電氣の生ずることを見た。併し、破壊と同じであるとしても、摩擦と呼ばれる現象そのものについても調べる必要はある。この章ではその爲に行はれた實驗に就いて述べる。

摩擦される氷の面が粗であれば明かに破壊が伴ふので、摩擦面は滑かにしなければならない。今まで用ひた氷は主として空氣中で昇華して出來た骸晶性の霜の結晶であつたが、表面の滑かな氷は水から凍らした氷に於てでなければ得ることが困難である。したがつてここに述べる實驗の結果は昇華によつて出來た氷の粒の間の摩擦と多少異なるが、兩方共氷であつて共通點のあることが豫想される。

§ 18. 實驗方法

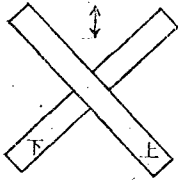
摺動子として第 41 圖のやうなものを用ひた。銅板製の長さ 10 cm の樋の形をしたものを二個作り、その外面に薄く氷を張りつける。摺動子を冷しておいて、その背の部分の水のなかに浸し、急速に引上げ



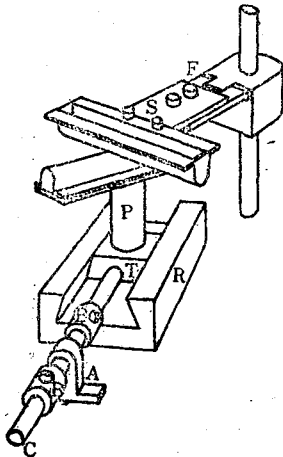
第 41 圖

ると表面の滑かなうすい氷をつけることが出来る。同じことを繰返せば厚さが増す。このやうにすると 0.2~2 mm の間の任意の厚さのものが得られる。水には再蒸溜水を用いた。

摺動子は氷のついた背を互に接觸させて、上下に重ね、第 42 圖のやうに互に直角におく。上の摺動子を固定し下の摺動子を兩摺動子の間の角を二等分する方向、即ち圖に矢で示した方向に動かして氷の摩擦を起させる。上の摺動子を電位計につなぐ。このやうな摩擦の仕方は Shaw の考へたもので、¹⁾ 上下の摺動子は全く同一の條件の下にあり、接觸點は運動と共に新たにされる。實際の装置の見取圖は第 43 圖に示す如くで、接觸面の壓力を常に同一に保つ爲に、上の摺動子はエポナイトの腕木 S を介して、蝶番 F で支へてある。上の摺動子は前後左右には動き得ないが、上下にだけは自由に動き得るので、摺動子の質量によつて定められる一定の壓力が接觸點にかかる。下の摺動子は眞鍮製の敷居 R に沿つて滑るエポナイト棒 P の上にのせ、P の臺 T につけた鐵棒 C を手で前後に押したり引いたりする。下の摺動子は P によつて地面から絶縁されてはゐるが、多くの場合針金で接地して測定を行つた。下の摺動子の前後運動の範圍を限定する爲に、自由に位置の變へられる止め金 B を C にとりつけてある。尚、全装置はトタン張りの大きな木函の中に入れ、外からの電氣的擾亂を防いだ。



第 42 圖

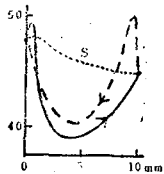


第 43 圖

§ 19. 測定結果

摺動子の長さは 10 cm あるが、接觸點がこの全長に亙つて移動するやうに大きく動かすと、上の摺動子の電位 v は複雑な變化をする。運動の始めで正電位に向つたものが途中で負になり、次いで再び正になると云ふやうな現象も起る。即ち接觸點の性質は全長に亙つて一様でないと考えられる。それで摺動子の運動範圍を 1 cm に限つて、狭い運動範圍について調べることとした。

1 cm の間を靜かに動かした時、電位 v の變化は第 44 圖のやうになる。横軸は接觸點の位置を表し縦軸に上方を正として電位計の指度を表はしてある。電位計の目盛は 0 から 100 迄に刻んであるが多くの場合 50 の邊りが 0 電位になるやうに調節して使つた。0.2 mm 及び 10 mm の ● 印の所では接觸點は靜止してゐるのである。下の摺動子は接地してあるから、電位計は氷の接觸點を通じて接地されてゐることになるが、圖に示された通り電位計の指度はこの二つの場所ですこし異つてゐる。此の場合電位計の接地電位の精密な測定は出来な

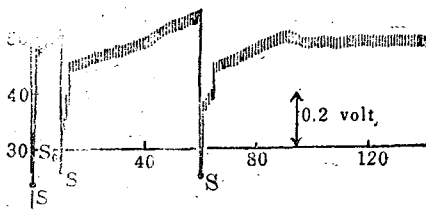


第 44 圖

か

(1) P. E. Shaw and E. W. L. Leavey: Proc. Roy. Soc. London (A) 133 502 (1932).

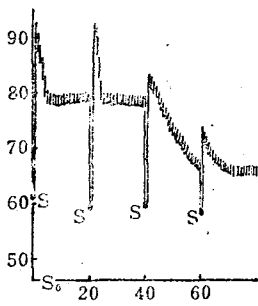
つたが、二静止點で差があることは氷の接觸點が静止してゐてもそこに電位差があることを示してゐる。左右の ● 印の點をつなぐ實線と破線が摺動子を動かした時の v の變化を表はすものである。實線と破線とは接觸點の運動の向きが互に逆な二つの場合に當り、兩者は多少喰違つてゐる。接觸點が静止してゐる場合の v 、即ち、接觸點を通じて電位計を接地したときの v を S 、直接電位計を針金で接地したときの電位を S_0 とすると、上にも述べた通り S は接觸點の場所によつて異り、又、 S と S_0 とは一般に少し異なる。第 44 圖の點線は S の變化を各點について測定した結果を示すものである。此の圖で 0 電位の位置は不明であるが、大體 $v \div 47$ 附近である。即ち S は正負に互つて變化する。この S の變化と摩擦によつて生ずる電位との間には定まつた關係のあることが考へられるが、その確定には成功しなかつた。第 44 圖に示した場合は最もよく起る場合の一例であるが、 S が急激に變化して、摩擦によつて生ずる電位 v が複雑な變化を示すことがある。又 v が摺動子の運動の向きによつて正負逆になることもある。このことから、摩擦による電位の正負は S の正負にのみよるのではなく、接觸點の進む向きに對して S が増加するか減少するかによるものであらうと考へられる。第 44 圖のやうな場合摺動子を速かに前後に運動させると、大きな負電位が現はれる。第 44 圖とは逆に曲線が正の方に曲つてゐるときには大きな正の電位が出る。第 45 圖はかかる往復運動をつづけた場合の v の變化の一例を示すものであつて、横軸は往復運動の回数、縦に v を電位計の指度を以て表はしてある。



第 45 圖

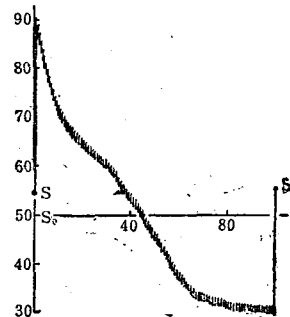
直接接地電位 S_0 は横軸に當る。往復運動中、 v は小さい變化を示すのでそれを示す爲に帯形の線を用ひた。運動を止めると v は急速に S になる。第 45 圖では 10 回往復して止め次に 50 回往復して再び止め、更に又運動を開始した。この場合は常に

v が正であつてその値も大きな變化を示さず簡単な場合であるが、この他いろいろな場合が起る。



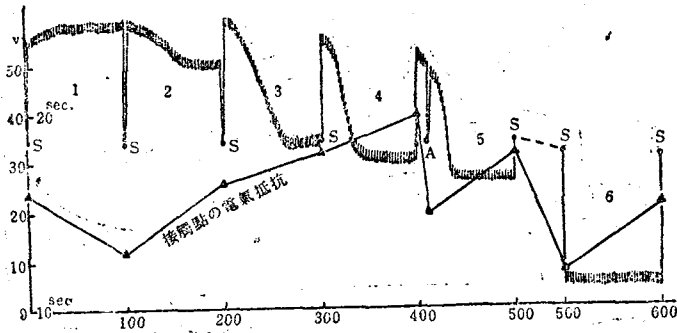
第 46 圖

第 46 圖は往復運動の最初に於て v が大きな振れを示し、その後下つて一定の値を示す場合、第 47 圖は始め正であつた v が往復運動を續けるうちに負に變つた場合である。しかも摺動子につけた同じ氷を用ひて、接觸點の位置をかへただけで、このやうないろいろな場合が起り得るのである。



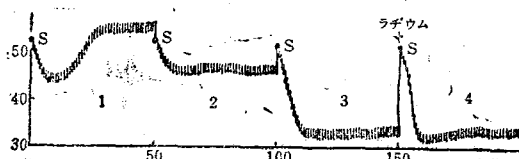
第 47 圖

第 48 圖も第 45~46 圖と同様なものであるが、運動休止の點を境として區劃し、それに圖に示したやうに番號をつける。1 と 2 との曲線は運動休止點を狭んで



第 48 圖

互に連続してゐるが、2の終りになつて v は下つてゐる然るに3の初めに於ては v は1のときの値に恢復し、その後急激に下つてゐる。4に於ても同様である。ただ初期に於ける v の恢復が少し弱くなつた。5でも同様初めに於ける v の恢復が認められるが、この v が未だ下り始めないうちに運動を停止して見た。それがA點である。そして再び運動を始めると v はAの直前と同じ値に戻り、それから急に減少して行き、遂に負の値をとるに到る。此の實驗で0電位は大體Sの附近、即ち $v \approx 35$ 附近と見做される。5と、6との間には15分間の運動休止を置いたが、この休止の後には v は運動の初めから大きな負の値を示した。このやうな v の變化は、接觸點の状態の變化によるものと考へられるので、接觸點の電気抵抗にも變化が認められるであらうと想像される。それで運動を休止することに電位計に電池によつて一定の電位を興へ、氷の接觸點を通じての放電速度を測定した。圖の▲印で示した測定點がそれで、電位計の指針が二つの定つた目盛の間を通過するに要する時間を表はしたものである。したがつてこの時間が永ければ抵抗は大で、短かければ小さい。抵抗は1の終りで最初よりも少し小さくなる。 v は逆に少し大きくなつてゐる。2の終りでは、 v がかなり小さくなつてゐるが、それと共に抵抗は大きくなつてゐる。3と4との終りでは、 v は殆ど0であるが、抵抗は前よりも更に増加した。所が5の初めに於て、 v が未だ小さくなり始めないうちに運動を休止したA點では、抵抗が小さくなつてゐる。5の終りの v が負になつた所では、抵抗は再び増す。併し、 v が0になつた3、4の終りに比べれば、少しではあるが小さい。更に6になると、 v は負の大きな値を示すが、抵抗は減少してゐる。以上の事から、 $|v|$ が小さいときには接觸抵抗が大きく、 $|v|$ が大きいときには小さいと云ふことが出来る。この種の測定は、繰返し行ひ例外がないとは云はれないが、大抵の場合同じ結果が得られた。この實驗で氷の接觸點の壓力は略20grであるが、上の摺動子に錘りをのせて壓力を増加すると、 $|v|$ は一般に増加し抵抗は下る。 $|v|$ の増加に伴つて抵抗が減少すると云ふ點に於て、これら二つのことがらは相似



第 49 圖

てゐる。

ラヂウムの γ 線で接觸點附近を照射することも試みたが、これは殆ど影響を示さなかつた。第49圖がその結果である。1の範圍で v は負から正に變り、2で負に

なり、3 で更に負になつた。3 に於ては v の變化が略落ついて、これ以上大きい變化は現れまいと豫想されたので、4 を始める前にラヂウムで照射したが、僅か許り $|v|$ が増したことは認められるが、殆ど變化はないものと見られる。別に行つた同様な實驗でも、 v が正であつて、照射の結果 v が少し増加することが認められた。併しこれらが實際に照射によつて起された變化か否かは確定することは出来ない。

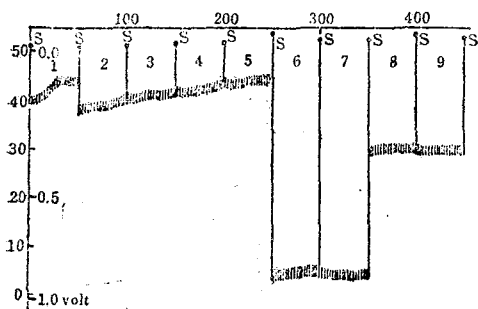
これまでの實驗は、すべて下の摺動子を接地して行つたものであるが、下の摺動子も絶縁し、上下の摺動子を同時に電位計に繋ぐと電位計の指針は全く振れない。即ち、上の摺動子と下の摺動子とに現はれる電氣は符號が互に逆で等量である。

以上の通り、他の物質に於ける摩擦電氣と同様に氷の摩擦電氣の現象も亦複雑であつて簡単な法則を求めることは出来なかつた。併し温度の異なる氷を摩擦するときには、明確に電氣の符號を決定することが出来る。次節にその點に關する實驗の結果を記す。

§ 20. 上下の摺動子の温度が異なる場合

低温實驗室の温度より、 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}\text{C}$ 位高い温度で凍り始めるやうなアルコールと水との混合液を、略凍り始めの温度にして置いて、上の摺動子の窪みに入れる。混合液が凍るには可成り長い時間がかかるのでこの方法によつて上の摺動子の温度を室温より高い一定の温度に暫く保つことが出来る。下の摺動子の温度は室温と同じである。氷の接觸點に於て、上下の氷の間にどれ程の温度差があるかははつきり判らないが、このやうにして摩擦すると、温度の高い上の氷の方が常に負電氣を得る。温度差を與へない前に上の氷が負電氣を示してゐた場合はその負電位は増し、正電位を示してゐた時でも負電位に變る。摩擦してゐない時の電位、即ち前節の S も温度差を與へると變るが、それは負の方向へ變るとは限らず、正の方向に變ることも時々ある。

第 50 圖は 1 から 9 までの範圍にわけられてゐる。1 乃至 5 は接觸點の壓力の影響をみた



第 50 圖

もので、6, 7 が温度差の影響を示す。1, 2 に於ては接觸點の壓力は 20 gr である。3 では上の摺動子に 9 gr の錘りをのせ、4 では 17 gr の錘りをのせて接觸點の壓力を増した。一般に壓力が増せば $|v|$ が増すのであるが、この場合は例外で殆ど變化を示さない。5 では再び錘りを取り除いた。此處で上の摺動子にアルコール

を入れて、6, 7 を測定した。室温は -26.0°C 、アルコールの凍る温度は -22°C であつた。アルコールの重量は 10 gr である。前の實驗で錘りをのせても v は餘り影響されないことが分つてゐるから、アルコールの重さによる接觸點壓力の増加は v に効果を及ぼさない筈である。したがつて 6, 7 に於て $|v|$ がそれまでの値の 6 ~ 7 倍に増したのは、上の摺動子の温度が下の摺動子の温度よりも高いことに原因すると見なけ

ればならない。再びアルコールを取除いた結果は 8, 9 に示され $|v|$ は半分以下に減少した。ここにあげた例は、接觸點壓力の増加に $|v|$ の増加が伴はない特別な場合である。壓力が $|v|$ を増加させる場合についても、アルコールの重量の爲の壓力増加による分を差引いて、尙非常に大きい v の増加が負の向きに現れる。

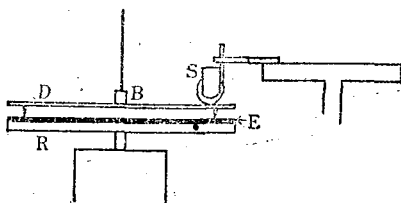
アルコールの溫度と室温との差が大きい程溫度差によつて生ずる負電位は大きい、あまりにこの溫度差を大きくすると下の摺動子の表面に白く霜がつく、これは上の摺動子の氷の蒸氣壓が下の摺動子の蒸氣壓よりも高い爲に、水蒸氣が上の氷から蒸發し下の氷の表面に凝結する爲である。このやうなときは、 v は負であつてもその絶對値は比較的小さく、時には却つて v が正になることもある。下の摺動子の表面に第 22 圖の裝置を用ひて故意に霜をつけ、上の摺動子には滑かな氷をつけて同溫度で摩擦すると、 v は大きな正の値を示す。霜のついた下の摺動子はその表面に小さい氷の粒をつけたのと同様である。大きい氷と小さい氷との摩擦に於ては、大きい方が正に、小さい方が負に帶電すると云ふ先に得た結果とよく合つてゐるわけである。そして上下の摺動子の溫度差をあまり大きくしたとき、かへつて上の摺動子の方が正電氣を持つことは、溫度差の効果よりも、下の摺動子に霜がついた爲に生ずる氷の大きさの差による効果の方が大きいと考へることによつて説明される。

第 2 表は、溫度差と溫度差の爲に生じた v との關係を示すものである。 t_r は室温 t_a はアルコールの溫度 $\Delta t = t_a - t_r$ である。又 v_0 は溫度差を與へずに摩擦したときの v の値、 $v_{\Delta t}$ は溫度差 Δt を與へて摩擦したときの v である $\Delta v = v_{\Delta t} - v_0$ であつて、これが溫度差 Δt によつて生じた電位になるわけである。尙、アルコールの重量による壓力増加によつて生ずる $|v|$ の増加分は $|\Delta v|$ に比較すると一般に小さいので、それについての補正は省略した。

第 2 表

t_r (°C)	t_a (°C)	v_0 (ボルト)	$v_{\Delta t}$ (ボルト)	Δt (°C)	Δv (ボルト)
-26.0	-19	-0.1	-0.6	7	-0.5
-25.0	-19	+0.4	-1.1	6	-1.5
-24.5	-19	+0.6	-0.4	5.5	-1.0
-24.5	-19	-0.1	-0.9	5.5	-0.8
-26.0	-22	-0.3	-0.9	4	-0.7
-28.0	-26	-0.3	-0.5	2	-0.2

§ 21. 廻轉する氷の圓板を用ひる實驗



第 51 圖

第 51 圖の R は鐵製の直徑 25 cm の圓形水平廻轉臺である。この上にエポナイト板を敷き、その上に一面に薄い氷を張つた銅の圓板 D をおく、D は三本の脚でエポナイト板に接し、その中央には水銀を入れた鐵の小さい壺 B が取付けてある。水銀の中に上

の方から差込んだ鐵棒を接地すれば D は接地され、又鐵棒を電位計につなげば D の電位が測定される。D に氷を張るには、D の縁に背のひくい棒をとりつけ、再蒸溜水を湛へて徐々に凍らせる。廻轉速度は 2 rev/sec を用ひた。S は動摺子であつて、半球形の底を持つうすい眞鍮板で作つた直径 2 cm の圓筒で、底の外面に氷をつけてある。氷と氷との接觸は S の下端と D の氷の表面との間に出来るわけである。S はエポナイト製の蝶番を介して P によつて保たれてゐる。P は不動のまゝにして置くことも出来るし、又聯動装置によつて圓板の廻轉と共に廻轉の中心に向つて動かすことも出来る。

前節の實驗では互に摩擦し合ふ氷が全く同じ状態にあつたが、この實驗では兩方の氷の状態が異なる。一方は平面であり、一方は半径の小さい球面をなす。又摺動子 S は常に同じ所で摩擦されるのに對して圓板の氷の摩擦點は常に新たにされる。

圓板を接地して廻轉させ、支へ P を不動にして S に現はれる電位 v を見ると、回轉開始と共に正の方向に増し、略 3~4 ボルトの一定の値に達するのが普通である。時には途中から v が減少して負になることもある。又廻轉を始めた瞬間に負の方向に大きく振れてから正の方向に向ふことが屢々ある。このやうな場合にも、一度廻轉を止めて、直ちに再び廻轉を起すときには、この負の振れは見られない。P を不動にしておくと、圓板の接觸點の軌跡は圓となり、この圓の上の一點は一廻轉毎に一度づつ摩擦される。P を聯動装置で移動させると、接觸點の軌跡は螺旋線になつて同じ點が二度以上摩擦點となることはない。P を移動させると、 v はやはり正であるが、P を不動にしておいた場合に比べて非常に小さく 0.3 ボルト位である。時には -0.5 ~ -1 ボルトの負の値を示すこともある。P を不動にしておいたとき、その第一廻轉に於ては圓板の接觸點は初めて摩擦をするのであつて、P を移動させた時の接觸點と同じ關係にある。これによつて、P を不動にしたとき屢々廻轉の初めに負の振れの生ずるわけが説明される。

電位計に並列の可變電器をつないで摺動子 S の系の電氣容量を大きくすると v の増加する速度は小さくなる。けれども最後に到達する値には變りがない。

廻轉を終つたのち圓板の氷の表面を顯微鏡で調べると、摩擦點の跡が幅の狭い切れ切れの條痕となつて見える。摺動子の接觸點附近は、光澤が失はれて少し曇つてをり、時には條痕を認めることもある。

前節に於けると同様にして、アルコールを摺動子の中に入れて摺動子をあたためると v は大きな負の値を示す。摺動子の接觸面は磨り減つて平になる。

圓板 D に霜をつけ、摺動子 S には滑かな氷をつけて摩擦させれば v は大きな正の値を示す。摺動子を接地して、圓板を電位計につないだ時に現はれる電位は、圓板を接地して、摺動子に現はれる電位と符號は逆で大いさは相等しい。圓板摺動子を絶縁して共に電位計につなげば電位は全く現はれない。

空氣と固體、液體との摩擦に於て電氣が現はれた例は未だ知られてゐない。例へば空氣を細い

口から吹出したり、空氣を固體面に吹つけたりした時に電氣が現はれることがあつても、それは空氣中に含まれる塵埃とか、空氣の膨脹の際に水蒸氣が凝結して出來た小さい水滴とかが固體面と衝突するときに起るものである。併し氷と空氣との摩擦に於て電氣が生ずるか否かは未だ調べたのを聞かないので、一應それを調べて見た。摺動子 S をとり去り、圓板を電位計につないで廻轉させた。圓板の表面で氷と空氣との摩擦が起つてゐる筈である。電位計の感度を出来るだけ高くして見たが、圓板の電位は變化しなかつた。かかる種類の電氣の測定に對しては方法が不完全であるから、これを以て氷と空氣との摩擦で電氣が全然起らないとは確定出来ないが、起るとしても非常に少いものであるには違ひない。

結 言

§ 22. 實驗結果の検討

豫備實驗によつて豫想され、その後の實驗によつて確かめられた三つのことがらを次にまとめる。

(1) イオンの發生。氷の粒が衝突し合ふと、氷自身も電氣を帯びるが、同時に附近の空氣中にイオンが現はれる。正負兩方のイオンが發生するが、氷の粒が新しい時には負イオンの方が量が多い。氷の粒に何回も衝突を行はせると、粒の角が鈍くなる。このやうな状態になると全體としてのイオンの發生量が減少すると共に、しばしば正イオンの發生量の方が負イオンの發生量よりも多くなる。イオンの運動度については精しい値が得られなかつたが $0.1 \text{ cm/sec/volt/cm}$ 程度の運動度を持つイオンが多い。この氷の粒の衝突に伴ふイオンの發生は Lenard⁽¹⁾ 及び Simpson⁽²⁾ によつて確かめられた水滴分裂の際のイオン發生と相似てゐる。水滴が分裂するときも、正負のイオンが發生し、負イオンの方が多し。水滴は正電氣を得ると考へられてゐるが、平均しての意味であつて、個々の水滴の電氣を調べれば負電氣を持つものも澤山あることが最近知られた⁽³⁾ 氷の粒の衝突の場合も同じで、平均としての氷の粒の電氣は正であるが、負電氣を持つ氷の粒も相當量生ずる。

(2) 温度の異なる氷と氷との摩擦によつて生ずる電氣。1°~2°C 以上異なる温度を持つ氷塊と氷塊、或は氷の粒と氷塊との摩擦に於ては、温度の高い方が負に、低い方が正に帯電する。温度の異なる氷の粒と氷の粒との摩擦は調べる事が出来なかつたが、その場合も同じことが云はれるであらう。又温度勾配の存在する部分に於て氷を破壊して二つに分つと、温度の低い側にあつた部分が正電氣、高い側にあつた部分が負電氣を得る。未だ確かめられたことではないが氷が摩擦し

(1) P. Lenard: Ann. d. Phys. 47 463 (1915).

(2) G. C. Simpson: Phil. Trans. 239 379 (1909).

(3) 中谷・寺田・小口。近く發表の豫定。

合ふとき、摩擦點に於て兩方の氷が一時融着してその融着が破壊されると云ふことが考へられる。二つの氷の溫度が異れば融着した部分に溫度差が出來、それが破壊されれば、初めに溫度の高かつた氷が負電氣を得ることになる。併し摩擦の場合には、摩擦點に摩擦熱による溫度上昇が起つてかかる意味の溫度勾配は殆どその作用を失ふかも知れない。摩擦點が高溫になると云ふことは、金屬の摩擦に於て Bowden⁽¹⁾ などによつて確かめられた事實である。Frenkel⁽²⁾ は摩擦點が高溫になる爲に摩擦體中のイオンの分布状態に變動を來し、その爲に摩擦電氣が発生すると云ふ理論を立てた。併しこれは異物質間に於ての摩擦についてであつて、二つの摩擦體に於けるイオンの分布状態が物質が異なる爲に相異ると云ふことに基をおいてゐる。ここに考へる氷の摩擦に於ては、摩擦體は同一物質であつて、ただ僅かな溫度差を持つだけである。この僅かな溫度差によつて兩方の摩擦體中のイオン分布に充分な差異が生ずるか否かは疑問である。ただこの實驗は、氷の融解點から餘り隔つてゐない溫度に於て行はれた。摩擦點の溫度上昇の爲にそこで融解が起れば、氷は融解點に於て電氣的性質に、例へば電媒常數に非常に大きな變化を示すから、僅かな溫度差もこの大きな變化と結び合つて利いて來ることも考へられる。

(3) 異なる大きさの氷と氷との摩擦によつて生ずる電氣。大きい氷の粒と小さい氷の粒、又は氷の粒と氷塊とが摩擦すると小さい方が負に大きい方が正に帶電する。もつとも氷の粒の場合は平均しての意味である。その原因としては二つのことが考へられる。氷の大小によつて電氣容量が異なることと、表面の曲率に差異があることとである。大きさの異なる二つの物體が接觸してそこに電氣が生じたとすれば、その電氣は電氣容量に従つて二つの物體の間に按分される。このことは水滴が分裂する場合についても拔山、能登兩氏によつて認められた。⁽³⁾ 併し、これによつては二つの物體間の電氣量の差異は説明出來るが、相反する符號の電氣が各々の物體に現はれることの説明は出來ない。けれ共電氣容量は他の仕方で作作用してゐるかも知れない。氷の摩擦の章に於て、銅板に霜をつけて接地し一方には電位計につないだ氷塊を用ひて兩者を摩擦させた實驗を述べたが、この場合にも形の小さい霜の方が負になつた。電氣容量については接地された霜の方が大きいのである。それ故電氣の符號の決定に對しては電氣容量は關係しないと一應見ることが出来る。

氷の粒の表面の曲率は一様ではなく、所々に尖つた角とか稜とかの非常に曲率の大きい場所がある。粒が小さくなる程この曲率の大きい部分の全表面に對する割合が大きくなる。それ故、大きい粒と小さい粒とが接觸する場合、小さい粒は曲率の大きい部分で、大きい粒は曲率の小さい部分で接觸する機會が多い。又、粒と塊との接觸では粒の曲率の方が常に大きい。したがつて發生する電氣の符號については、曲率の大きい面で接觸したものの方が負、曲率の小さい面で接觸

(1) F. P. Bowden: Proc. Roy. Soc. London (A) 154 640 (1936).

(2) J. Frenkel: J. of Physics (U. S. R. R.) 5 25 (1941).

(3) D. Nukiyama and H. Noto: Jap. J. Astr. & Geophys. 6 41 (1928).

したものの方が正になると云ふことが出来る。

表面の曲率が極めて大きければ、そこに物質的狀態の變化が起ることが考へられ、それが電氣の符號を決定すると考へられる。併し、もう一つ曲率の小さい面は、摩擦熱、破壊熱の爲に曲率の大きい面よりも温度が高くなり、先に述べた(2)のことによつて負電氣を得ると説明することも出来る。即ち、曲率の差異は結局温度の差異に歸せられるとするものである。併しこの考へと相容れない事實がある。§21の氷の圓板と氷の摺動子との摩擦に於ては、摺動子は同一の點で摩擦してゐるから、その摩擦點の温度は氷の圓板の温度よりも高くなる。然るに摺動子は多くの場合正電氣を現はす。併しこのことは、氷の圓板の表面は平であるとは云つても、實は小さな凸凹があるのに反し、摺動子は同一點が摩擦して磨り減つて平になるため、かへつて氷の圓板の方が曲率の大きい面で接觸することになると考へて一應の説明はつく。即ち、圓板の方が全體としては温度が低い、接觸點をなす小さな突起した部分では摺動子の温度よりも高い温度になつてゐると考へるのである。處が、摺動子の位置を動かさずに摩擦したときに比べると、摺動子を聯動装置によつて圓板の中心に向つて動かし、圓板の常に新しい面が摺動子と接觸するやうにしたときの電位の方が低い。これは上の説明に矛盾する。摺動子を動かさずに、圓板上の接觸點の軌跡を圓にしておけば、圓板の凸凹は摩擦の爲に次第に失はれて行く。それに反して摺動子を動かせば、圓板は常に新しい凸凹のある面で接觸するのでむしろ摺動子の正電位は増加しなければならぬ筈である。

かくして曲率が異なる爲に生ずる電氣と、温度の異なる爲によつて生ずる電氣とは別々の原因によるものと考へられる。同時に又、上にのべた氷の圓板の實驗の結果は説明が困難で今後の研究に俟つとする。氷以外の物質について、大きいものと小さいものとを摩擦したとき、小さい方が負になると云ふ例は他にもある。Rudge¹⁾は水晶の結晶面によつて電氣の正負が決定されないかと考へて、大きい水晶の結晶のいろいろな面を小さい水晶の結晶で摩擦した。結晶面の違ひによる効果は認められなかつたが、小さい結晶の方が常に負電氣を帯びた。

以上實驗によつて得られた三つの主な點を要約し、それに検討を加へたが、これら三つのことからは互に獨立した現象であることが判つた。

§ 23. 雷の電氣の成因

緒言に述べた通り、雷の電氣の成因に關する Simpson 及び Wilson の理論は水滴を基にして考へてゐる爲に、氷晶で出來た雷雲の上層部に於て發生してゐる電氣を説明するには適當しない。Simpson の實測の結果によると、雷雲の中部下部は負電氣を持ち、上層部には正電氣がある。又雷雲の下部の負電氣のなかには局部的に正電氣が存在する。Simpson の舊の理論によると、雷雲は上の方に負電氣を持ち、下の方に正電氣を持つことになる。中部、下部後方の負電氣、及び

(1) D. Rudge: Proc. Roy. Soc. London (A) 90 257 (1914).

下部の局部的正電氣は氣流の状態を考慮に入れると、この Simpson の理論によつて説明される。雷雲の中部及び下部では溫度が餘り低くなく、電氣の發生に水滴が關つてゐると考へればよいからである。併し上層の正電氣は他の説明に俟たなければならない。氷の粒の摩擦について得られた結果を用ひて、その成因を次のやうに考へることが出来る。

雷雲の上層では雲の成分は氷晶であり、同時に上昇氣流があるが、

(1) 氷晶は互に衝突し合つて自身は平均して正電氣を得附近の空氣は負イオンに富むやうになる。この負イオンに富む空氣は上昇氣流に運ばれて上方に逃れるが、正電氣を持つた氷晶は重いのでその位置に残される。

(2) 氷晶の大きさは大小いろいろある筈であるが、大きい氷晶は衝突によつて正電氣を得、小さい氷晶は負電氣を得る。小さい氷晶は上昇氣流によつて大きい氷晶よりも上の方へ運ばれる。

(3) 氷晶はもともと上昇氣流によつて地面近くから運ばれて來た水蒸氣が凝結して出来るのであるが、氷晶が出來てから上の方に運ばれるにつれて周圍の溫度は下る。大きい氷晶は熱容量が大きくて冷えにくい、小さい氷晶は冷え易い。したがつて氷晶が上昇するにつれて、大きい氷晶は小さい氷晶よりも高い溫度を保つことになり、これらが衝突すれば小さい方の氷晶は正電氣を得、大きい氷晶は負電氣を得る。正電氣を得た氷晶は軽いので尚上方へ運ばれるが、負電氣を得た大きい氷晶はそこに残される。

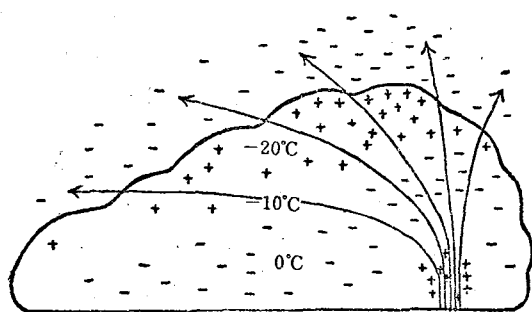
以上三つの事柄のうち(3)の効果は非常に小さいものと考へられる。この機構で充分な溫度差が生ずることは疑問である。それで氷晶からなる雲があると、上方には負電氣、下方には正電氣がたまる結果に導かれる。この下方の正電氣を Simpson の實測によつて示された雷雲上部の正電氣とすると、その上に尙負電氣が存在しなければならないことになる。併し Simpson の實測は正電氣の存在範圍を通過してその上方には出てゐない。したがつて、尙その上の負電氣の存在は不明である。負電氣があるとしてもイオンとか極めて小さい氷晶に附着してゐるのであるから、雲體の外雷雲の頂の上の大氣中に位置してゐる筈である。雷雲を遠方から觀察してゐたとき、雷雲の頂きから上方の大氣中に向つて雷光の發するのを見たとき云ふ報告があるが、これは雷雲の上の大氣中に電氣の存在することを示すものである。又筆者は雷雲の後方の縁から晴れた星空へ向つて放電の起るのを觀察し、その寫眞もとつた。⁽¹⁾ これは上昇氣流が雷雲の上部で後の方へ向きを變へ、先に述べたと同じ理由によつて雷雲の後方の大氣中に負の空間電荷を作つたと考へて説明される。

以上のやうにして、雷雲下部の電氣の成因は Simpson の水滴分離説に俟つとして、上部の分布については第 52 圖に示すものを得る。

Findeisen⁽²⁾ は風洞内の風の中に霧吹きで吹いた水滴を混じ、それを寒劑によつて冷された物

(1) 吉田順五：氣象集誌、昭和 18 年 2 月號。

(2) W. Findeisen：Meteorol. ZS. 57. 201 (1940).

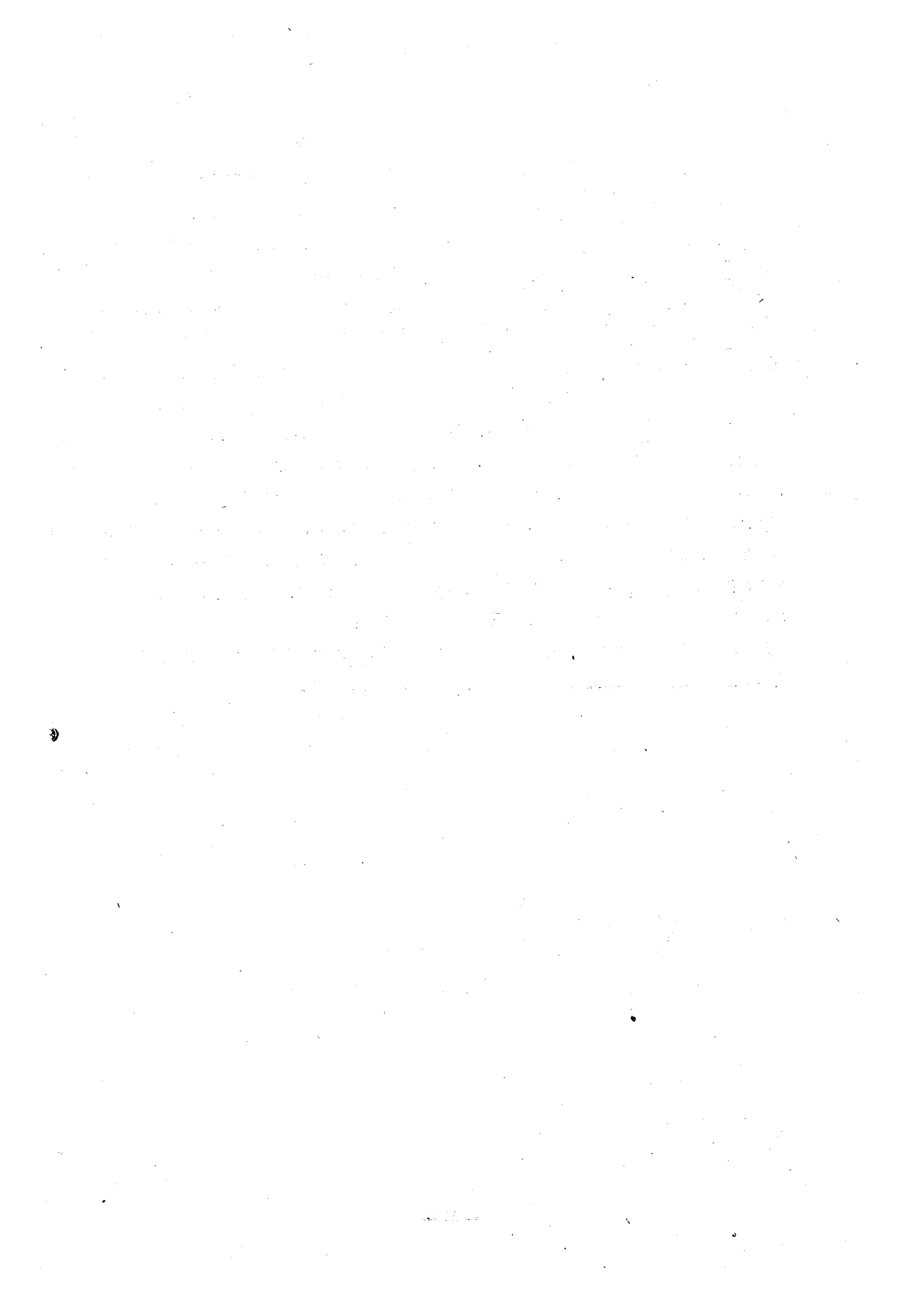


第 52 圖

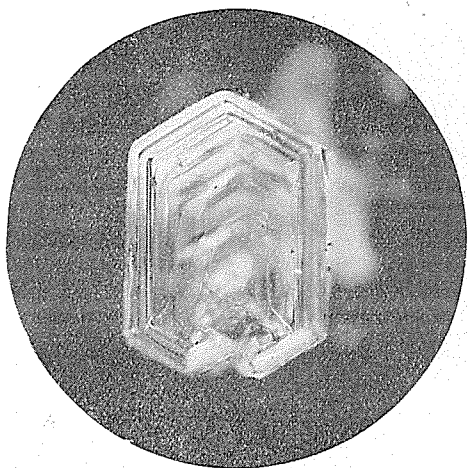
體に吹つけて、物體の表面に氷をつけた。
 この時物體は正電氣を現はす。氷のついた
 物體を暖め、同時に乾いた風をあてて氷を
 蒸發させると物體は負電氣を帯びる。この
 實驗により Findeisen は Simpson の實測
 によつて示された雷雲内の電氣分布を説明
 した。この實驗で氷に電氣が生ずるのは風
 によつて氷の表面から極めて小さい氷の粒

が吹きざられるためと Findeisen は考へ、ある場合には實際にかかる粒が風下に飛んで行くの
 を觀察してゐる。併し氷が凝結しつつあるときと、蒸發しつつあるときで反對の電氣を示すこと
 については説明を與へてゐない。これについては、§22の(2)によつて説明をつけることが出
 來る。氷が凝結しつつあるときには、物體は寒劑で冷されてゐるし、表面には凝固熱が発生しつ
 つあるので、氷は表面が暖かく、内部にむかつて温度が下る。それ故、この氷からその一部が引
 ちざられればそれは負電氣を持つて飛び去り、物體には正電氣を残す。氷が蒸發しつつあるとき
 は、氷は内部が暖く表面が冷いので、逆に負電氣が残される。

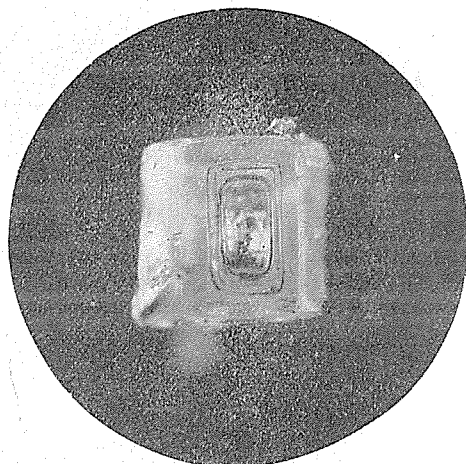
以上、氷の摩擦電氣について調べた結果を述べ雷の電氣の成因に及んだ。この仕事を行ふにあ
 たつて終始中谷教授から指導鞭撻を賜つた。深甚なる感謝を表記する。



No. 1

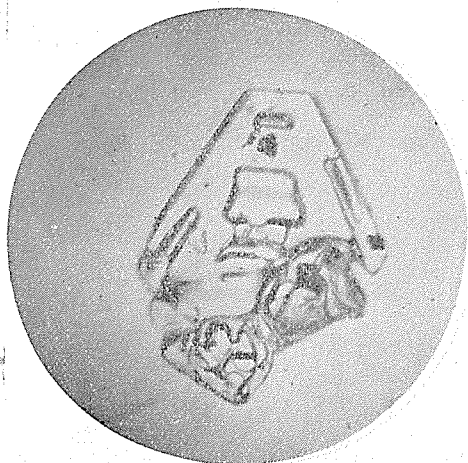


No. 2



No. 3

×11



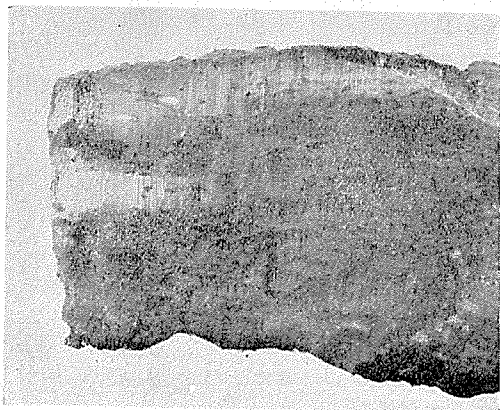
No. 4

×10



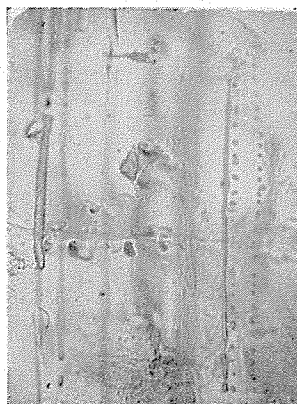
No. 5

×11



No. 16

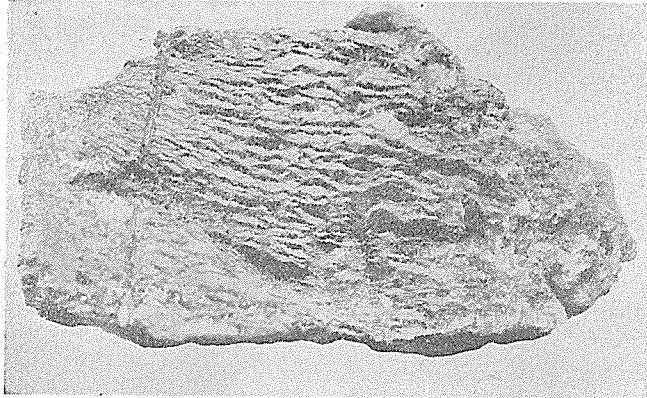
×10



×1/3

×11

No. 7

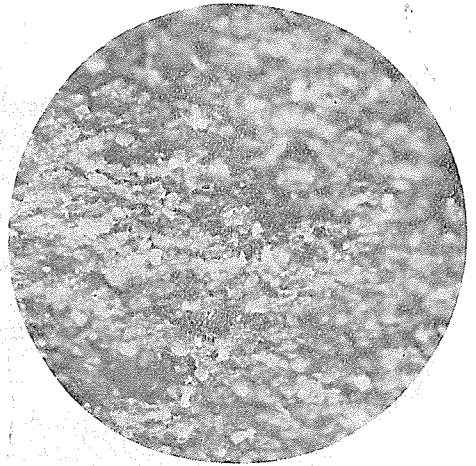


No. 8



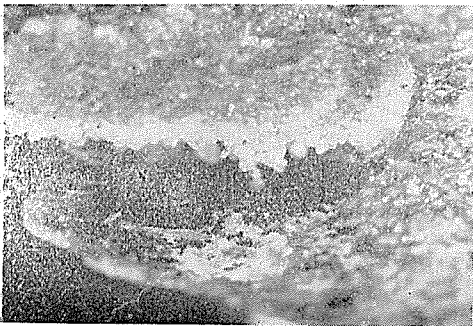
$\times 10$

No. 9



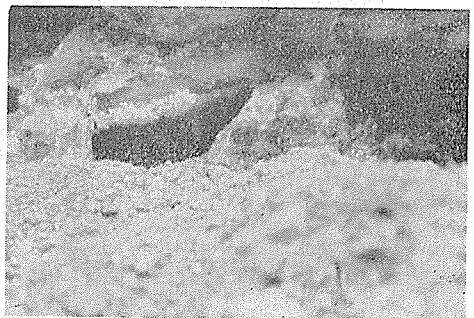
$\times 9$

No. 10



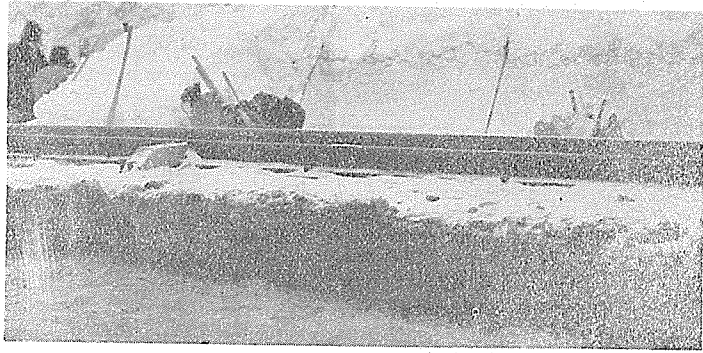
$\times 9$

No. 11



$\times 1/4$

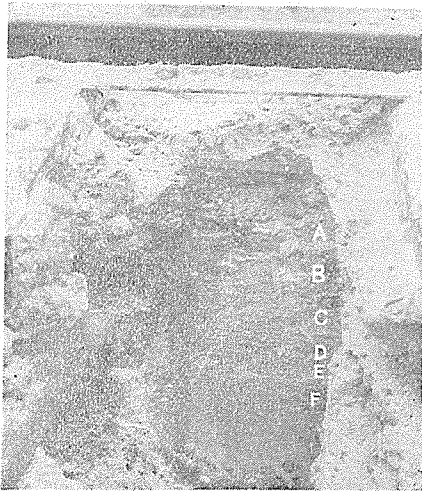
No. 12



帆加空洞全景

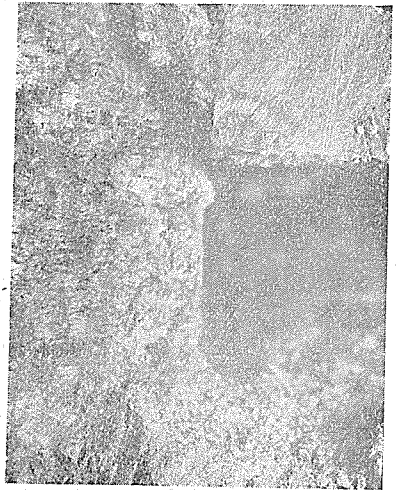
$\times 3/4$

No. 13



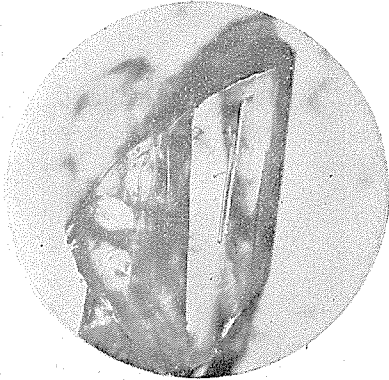
No. 15

No. 14

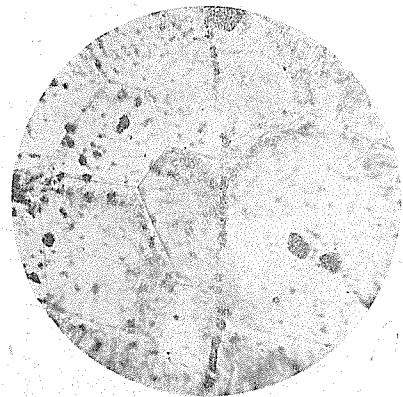


No. 16

$\times 0.43$

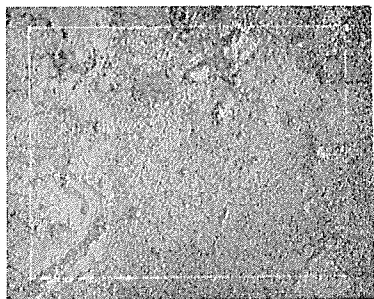


$\times 14$



$\times 23$

No. 17



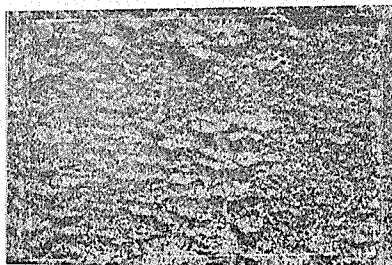
混凝土状凍結 (練平)×0.82
 $R=0.93, \gamma=1.21, R-\gamma=-0.28$

No. 18



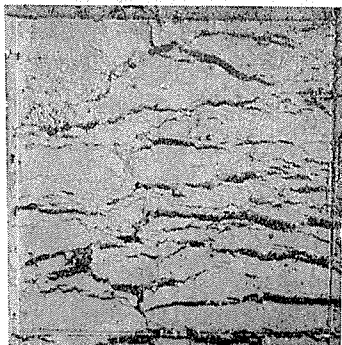
霜降状凍結 (深川)×0.9
 $R=0.88, \gamma=0.55, R-\gamma=0.33$

No. 19



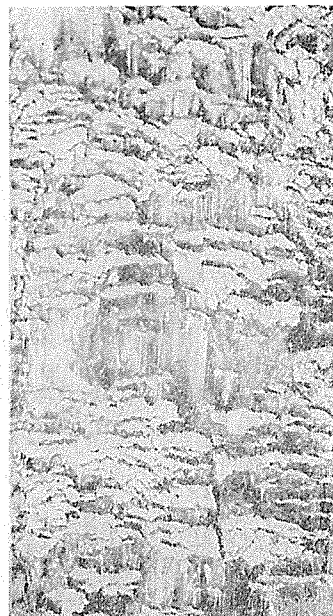
霜降と土入霜柱との中間 (深川)×0.9
 $R=1.28, \gamma=0.52, R-\gamma=0.76$

No. 22



霜降粘土 (幌加)×1.05
 $R=0.47, \gamma=0.79, R-\gamma=-0.23$

No. 20



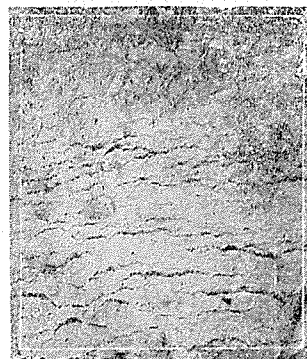
土入霜柱層 (幌加)×1
 $R=1.59, \gamma=0.73, R-\gamma=0.86$

No. 21



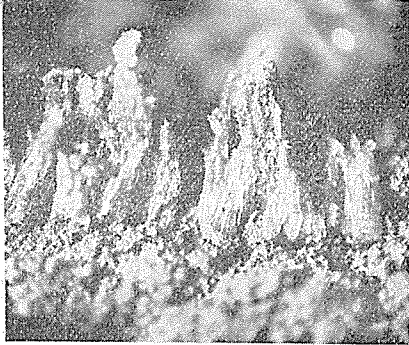
霜柱層及び土入霜柱層 (深川)×0.9
 $R=1.61, \gamma=0.39, R-\gamma=1.22$

No. 23



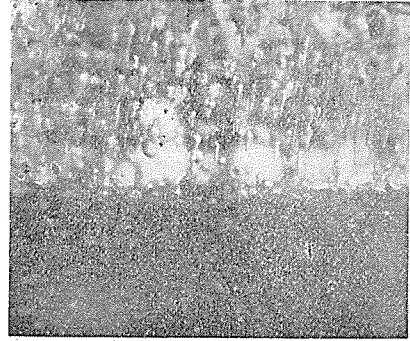
霜降粘土 (月形)×0.9
 $R=0.32, \gamma>0.32, R-\gamma<0$

No. 24



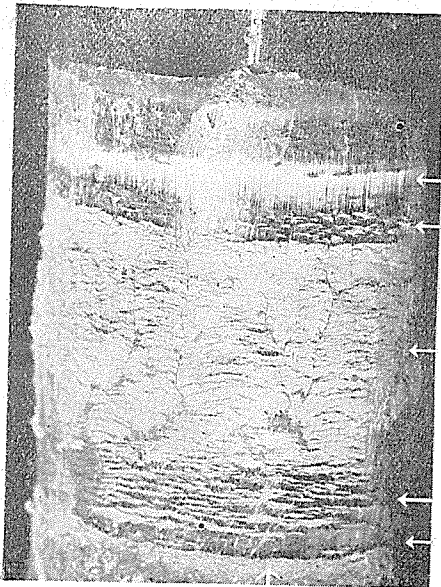
×1

No. 25



×4.8

No. 26



毛細孔目 ×3/4

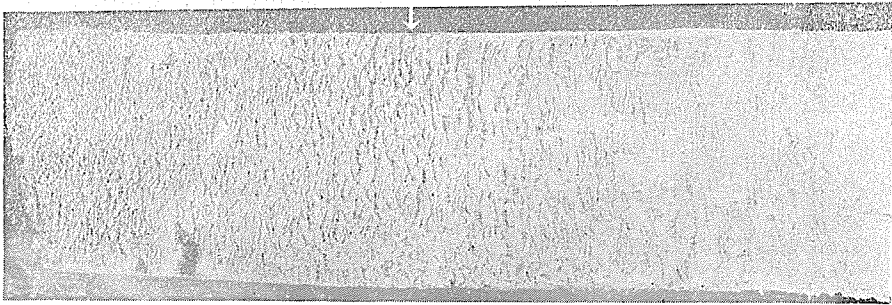
No. 27



氣溫急降下

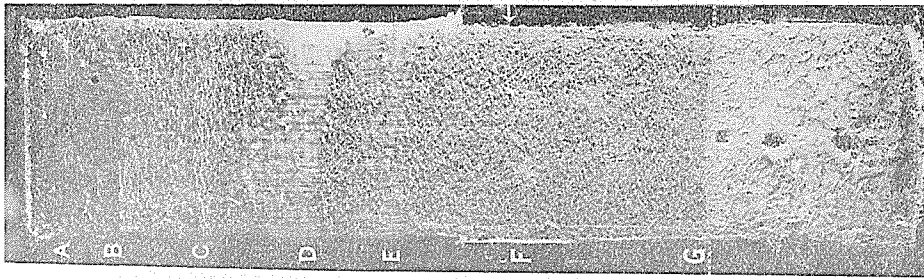
透明霜柱層
— 土人霜柱層
霜降凍結
— 土人霜柱層
凍結

No. 28

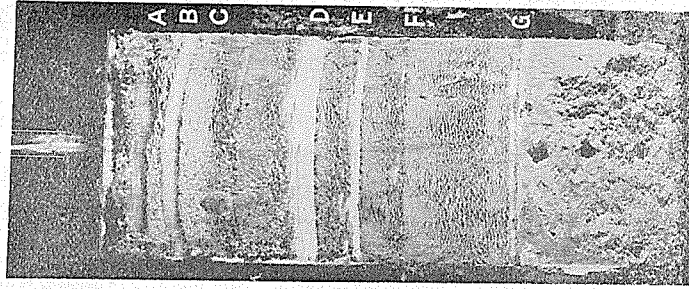


×0.58

No. 29

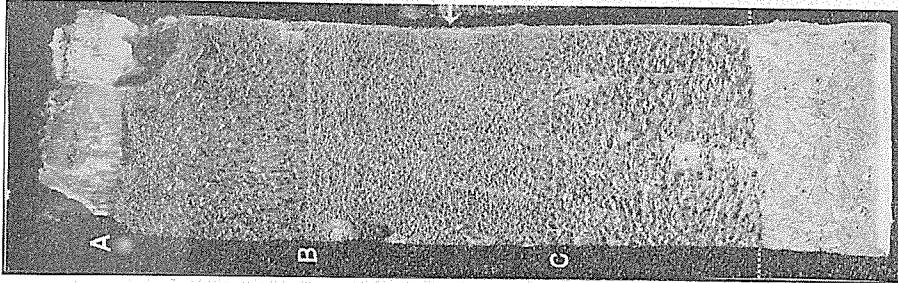


No. 30



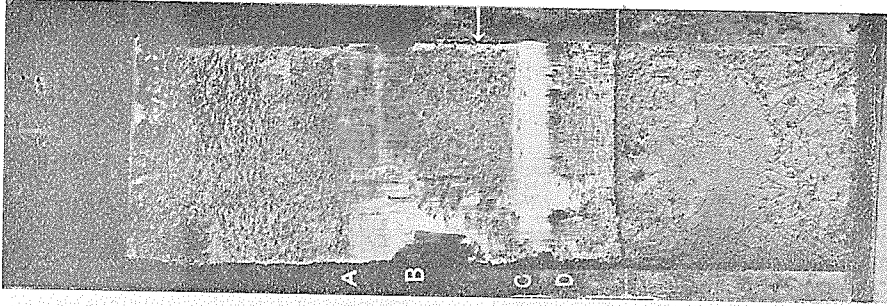
×0.50

No. 31



×0.58

No. 32

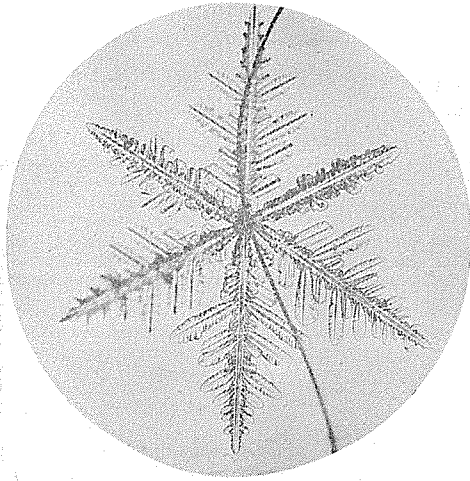


×0.50

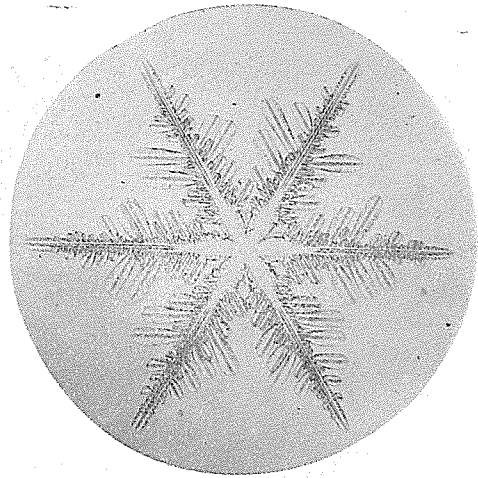
凍結
開始

←印は凍結開始前の土の表面

No. 33

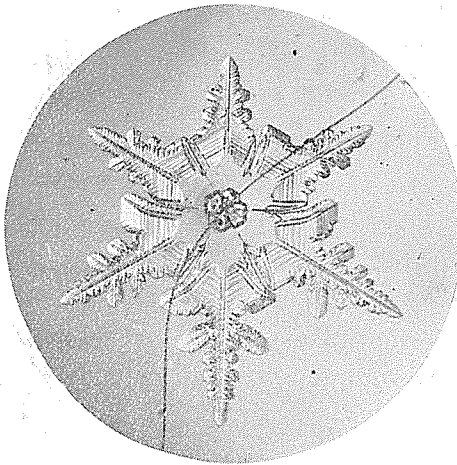


No. 34



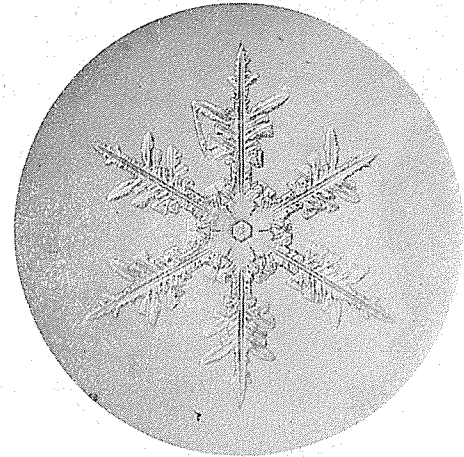
No. 35

×37



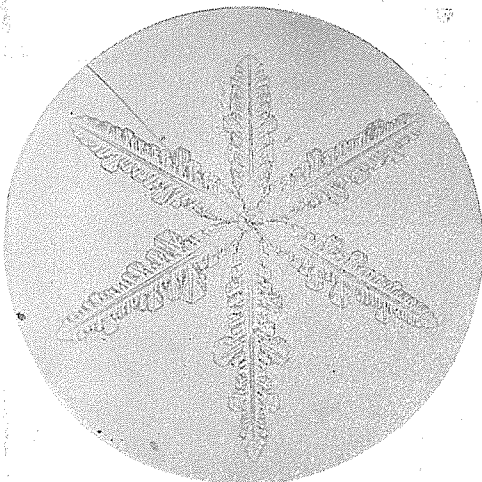
No. 36

×35.6



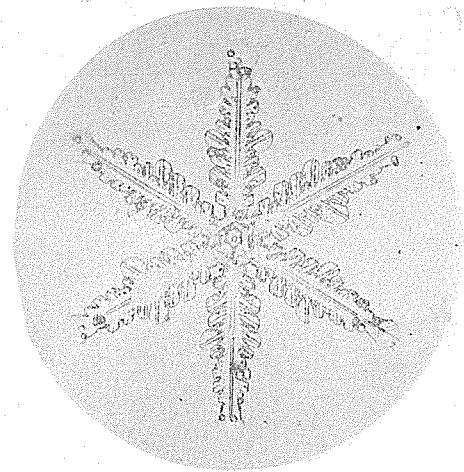
No. 37

×24



No. 38

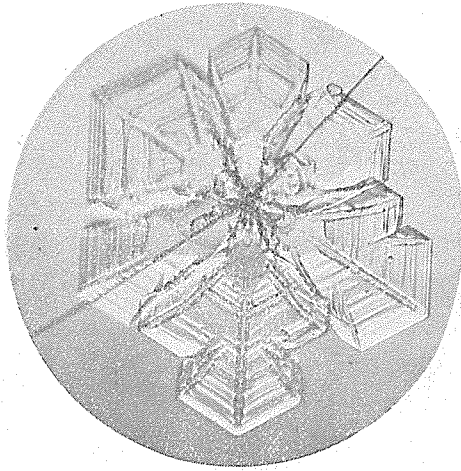
×19



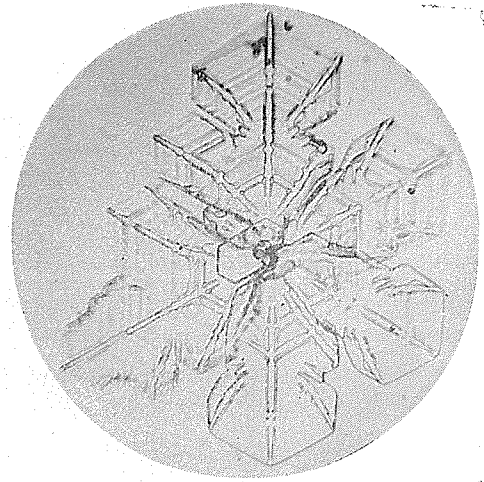
×37

×36.5

No. 39

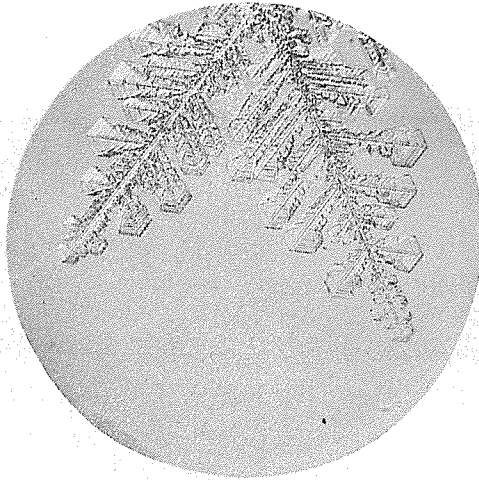


No. 40



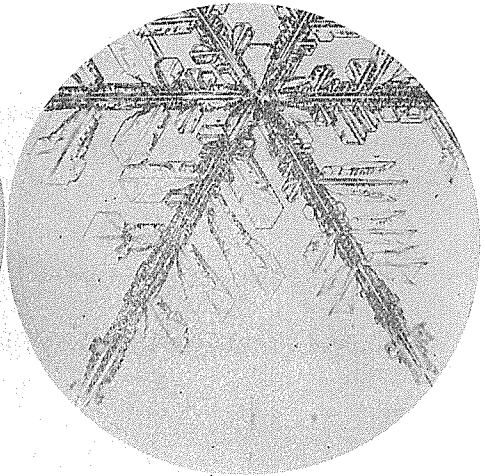
No. 41

× 30



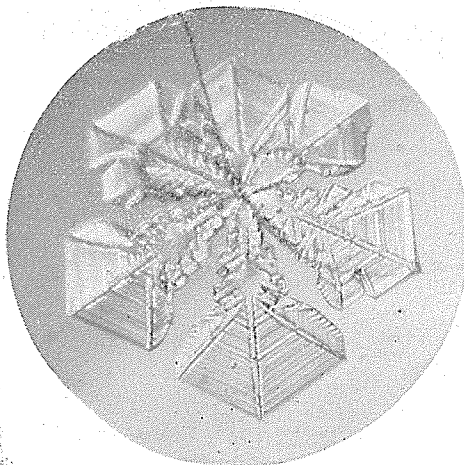
No. 42

× 60



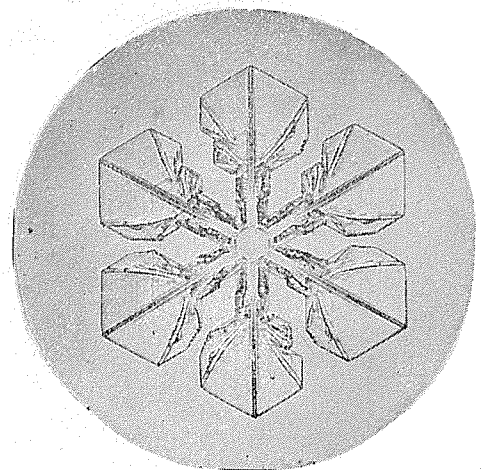
No. 43

× 20



No. 44

23×

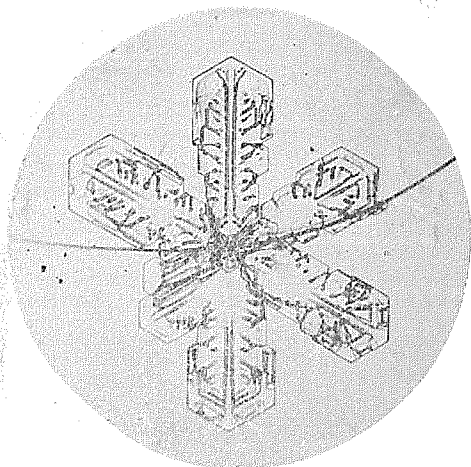


× 34

× 36

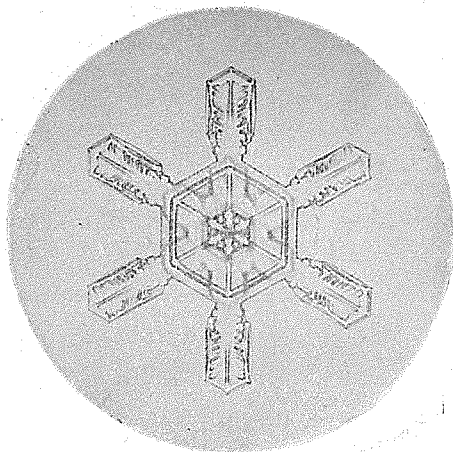
No. 45

人工雪



No. 46

天然雪

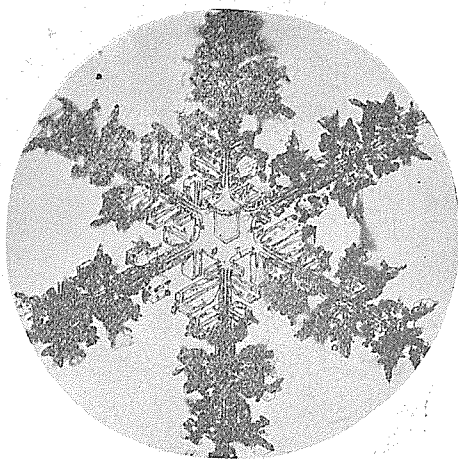
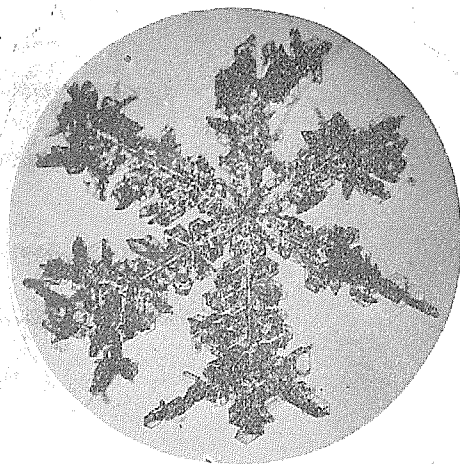


No. 47

×30

No. 48

×32

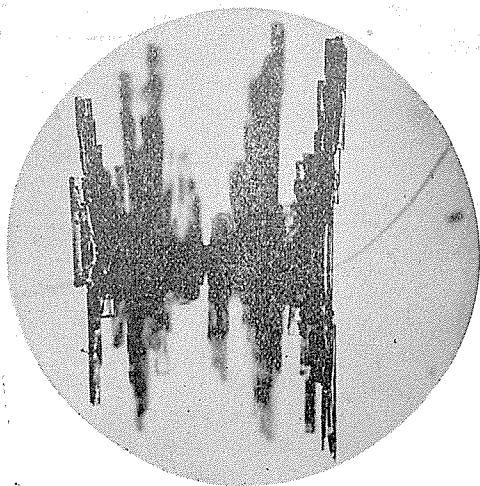


No. 49

×15

No. 50

×19.5

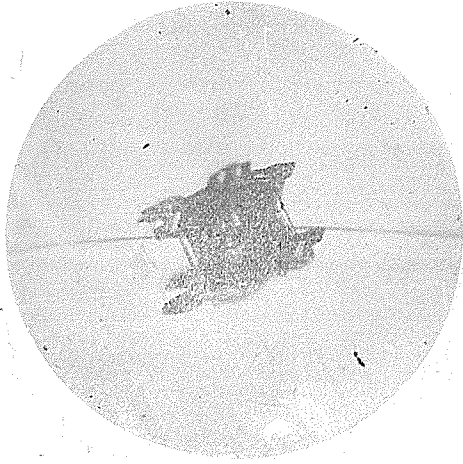


×37

×20

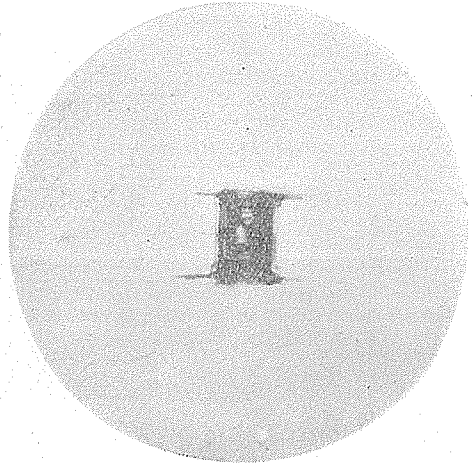
No. 51

人工雪



No. 52

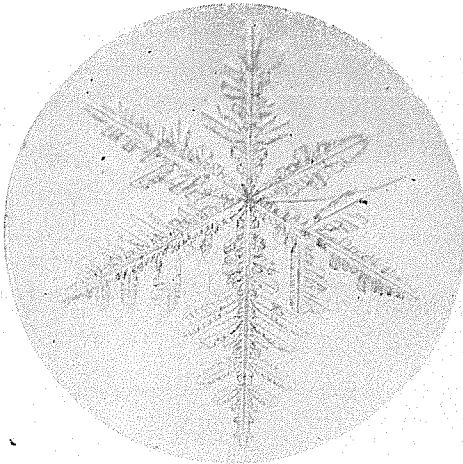
天然雪



No. 53

人工雪

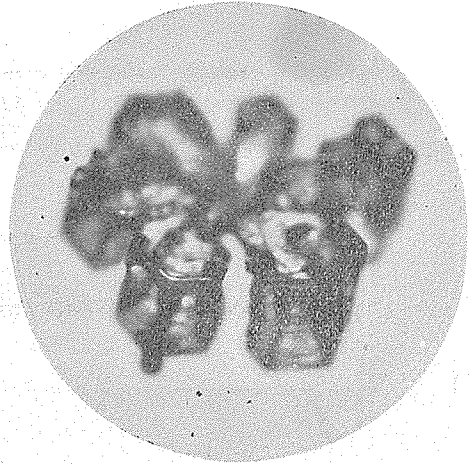
×53



No. 54

人工雪

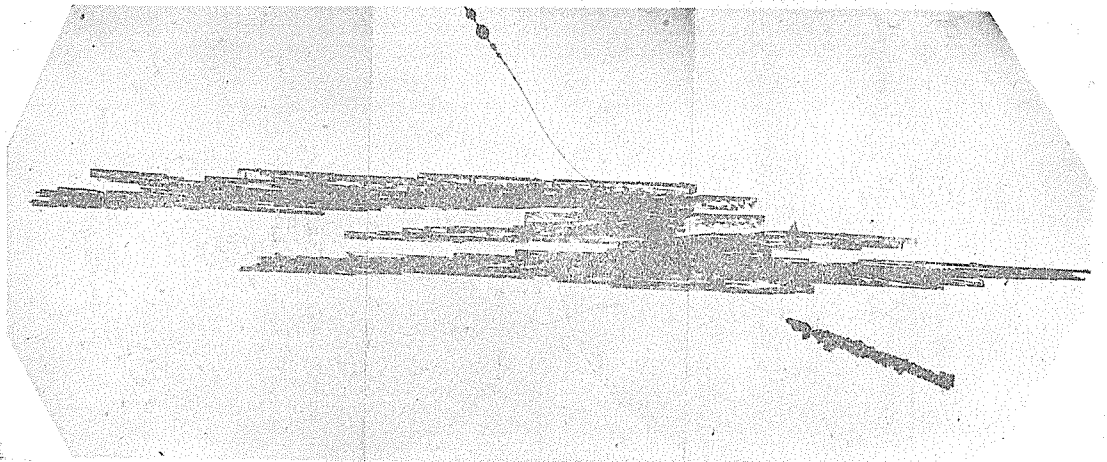
×23



No. 55

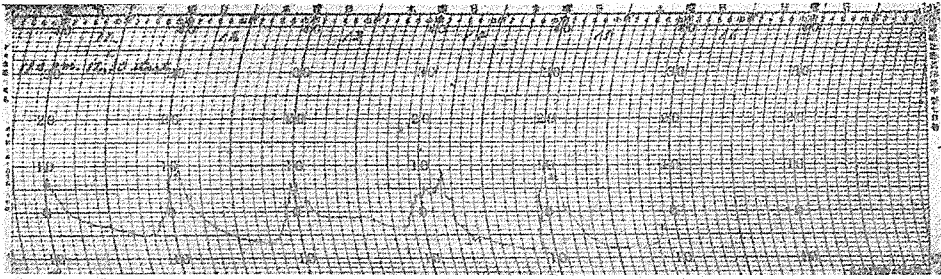
×24
人工雪

×23.5

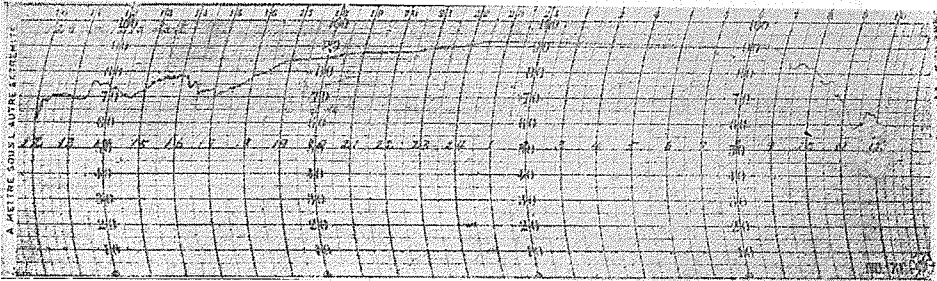


×8

No. 56

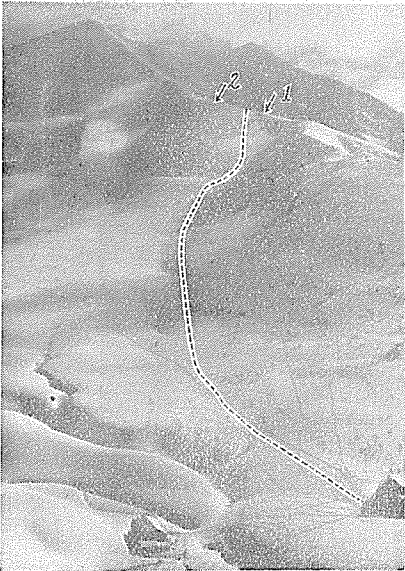


No. 57 室内自記寒暖計及び湿度計は地表面より 80cm の高さにある。



No. 59

No. 58

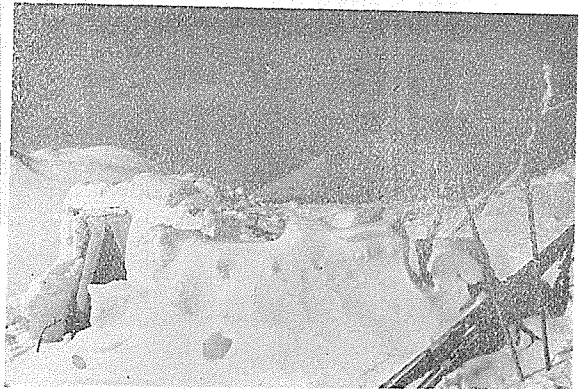


雪洞, 天幕



No. 60

雪洞



天幕

No. 61



← 龜甲狀凍結

黑土層

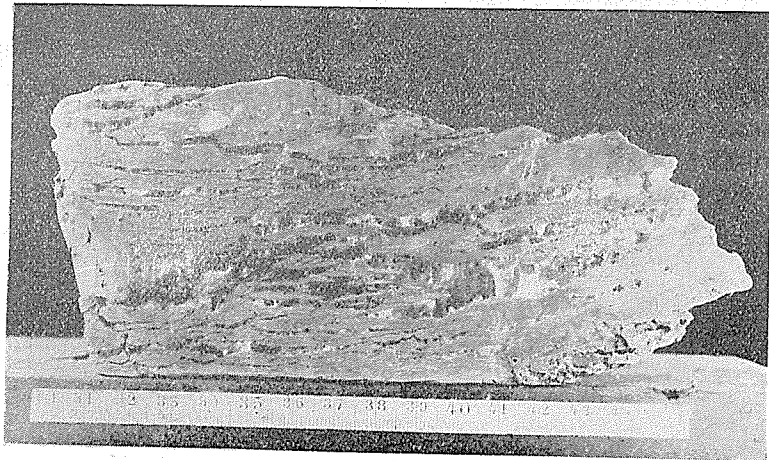


粘土層

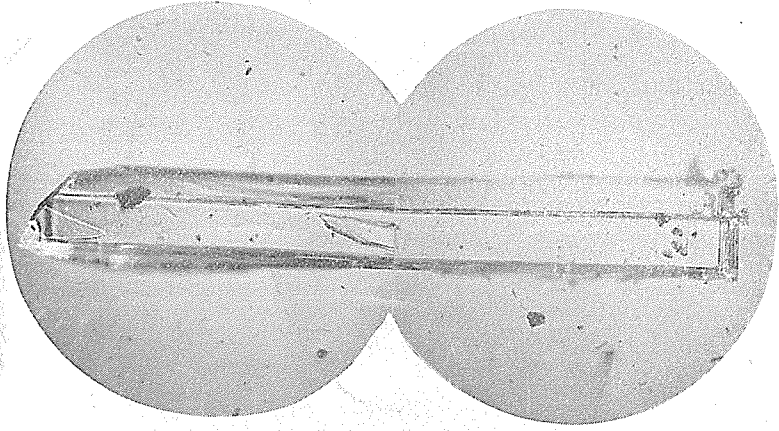
← 透明氷層

← 凍結線

No. 62



No. 63



×8

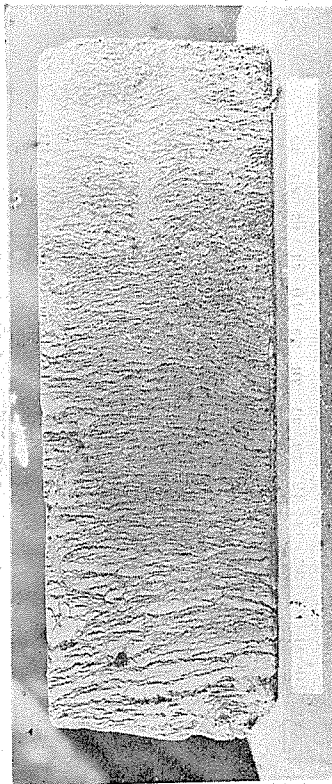
No. 65



×12

No. 64

上部 (蜂巢状凍結)



中央 (密霜降)

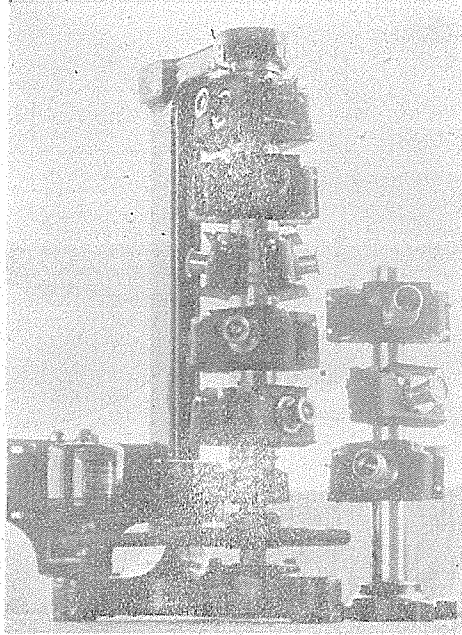
下部 (粗霜降)

No. 66



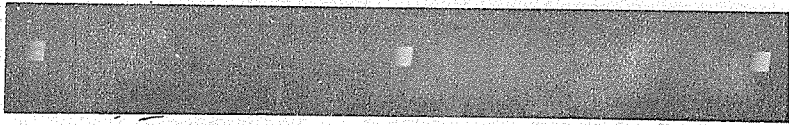
×8.5

No. 67



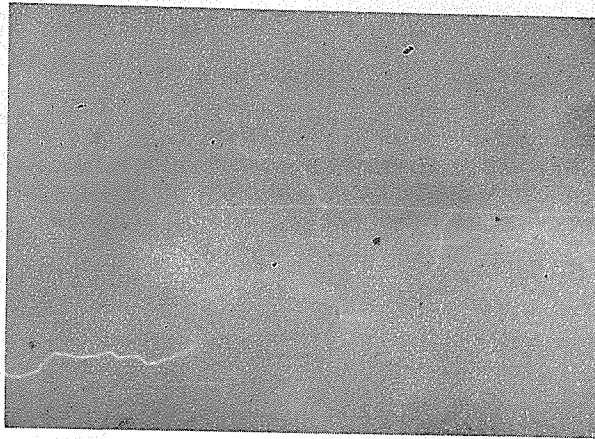
右 靜止寫眞機
左 廣視角可轉寫眞機

No. 72



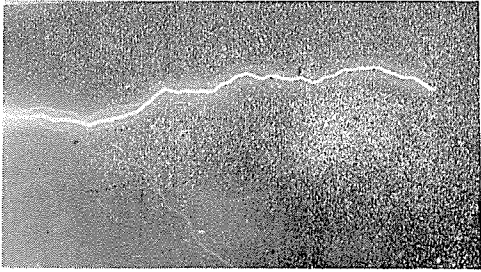
No. 94

時間標識



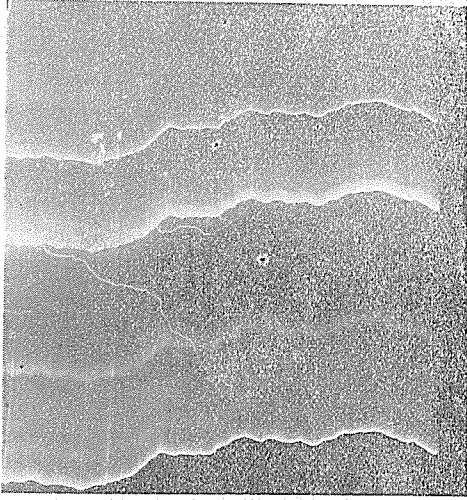
電光へ向ふ星空

No. 68



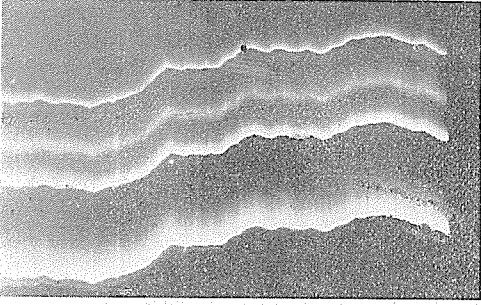
電光 1 靜止寫真

No. 69



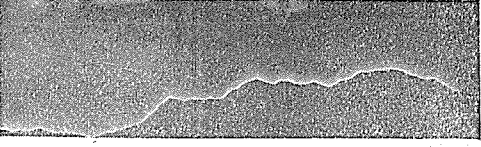
電光 1

No. 70



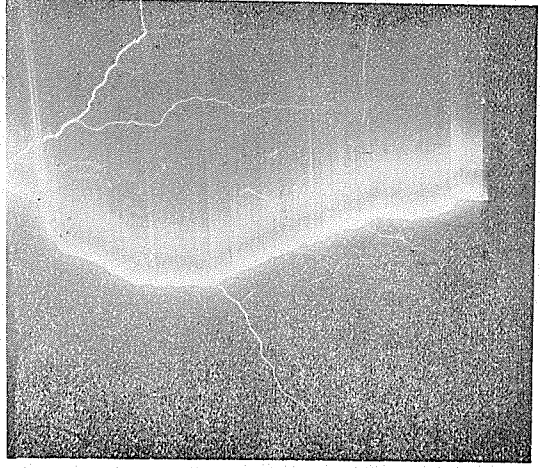
(3) (4) (5) (6) 電光 1 (7)

No. 71

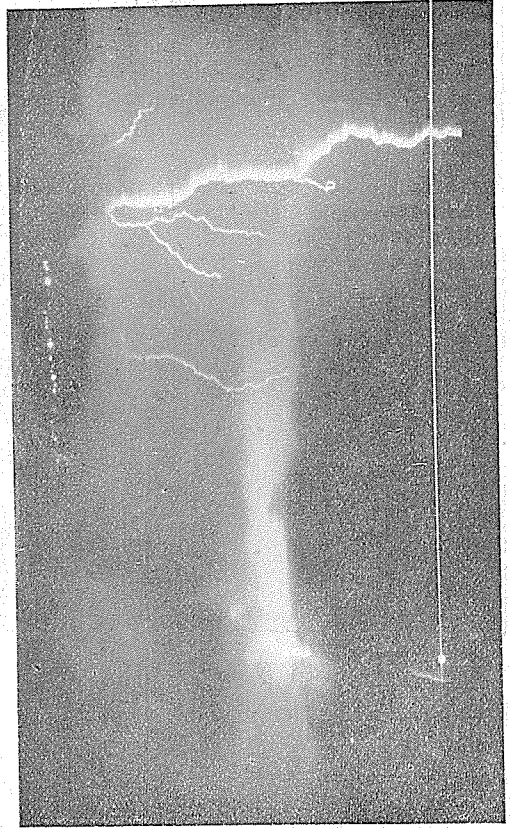


電光 1

No. 73

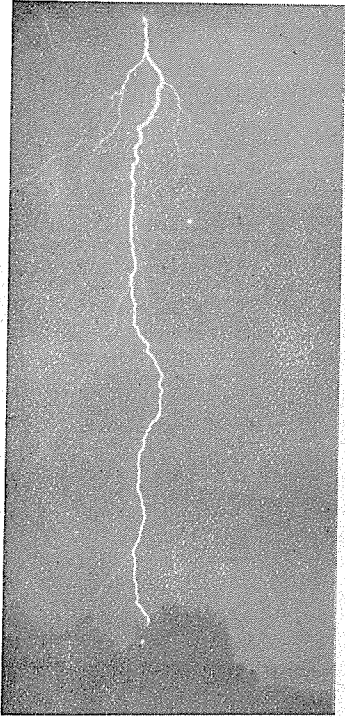


電光 2 第一閃光 (單一電光)



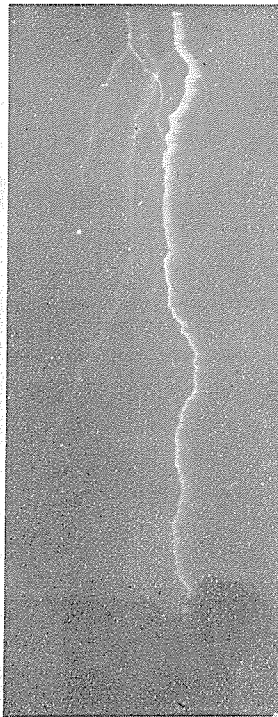
電光 3 第一閃光 (單一電光)

No. 75



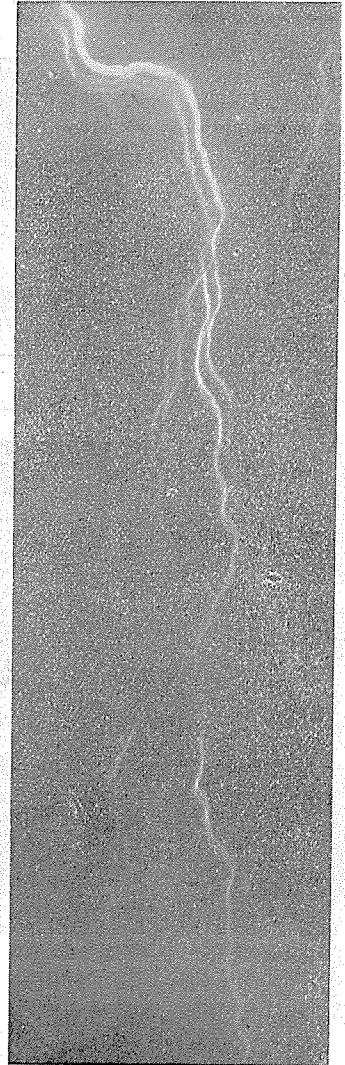
電光 4 静止寫眞

No. 76



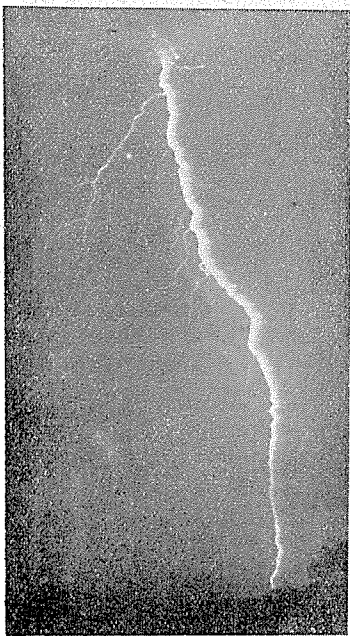
電光 4 第一閃光

No. 77



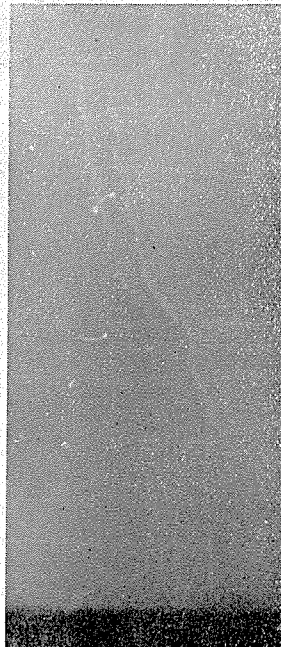
電光 5 寫眞機を手で揺りながら撮つた雲間電光

No. 78



電光 6 第一閃光

No. 79

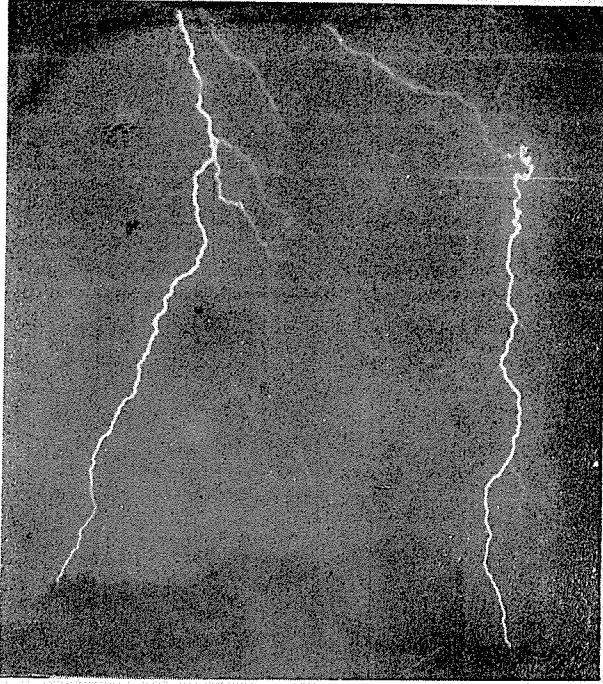


電光 6 第二閃光

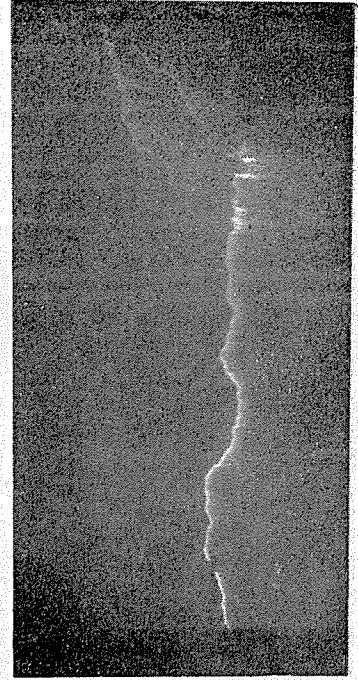
No. 80

No. 92

No. 81



電光 7 静止寫真

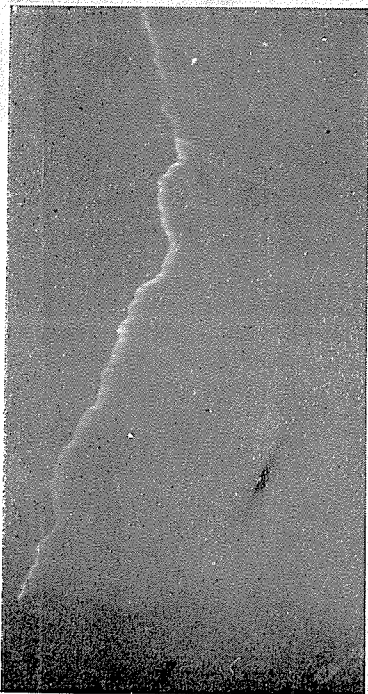


電光 8 第一閃光

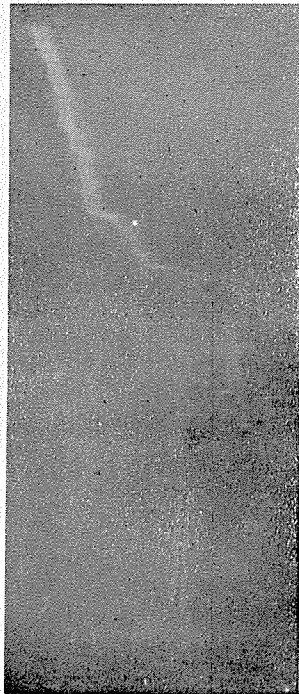
No. 82

No. 83

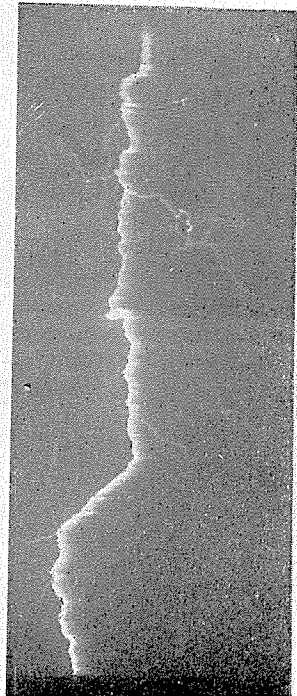
No. 84



電光 7 第一閃光

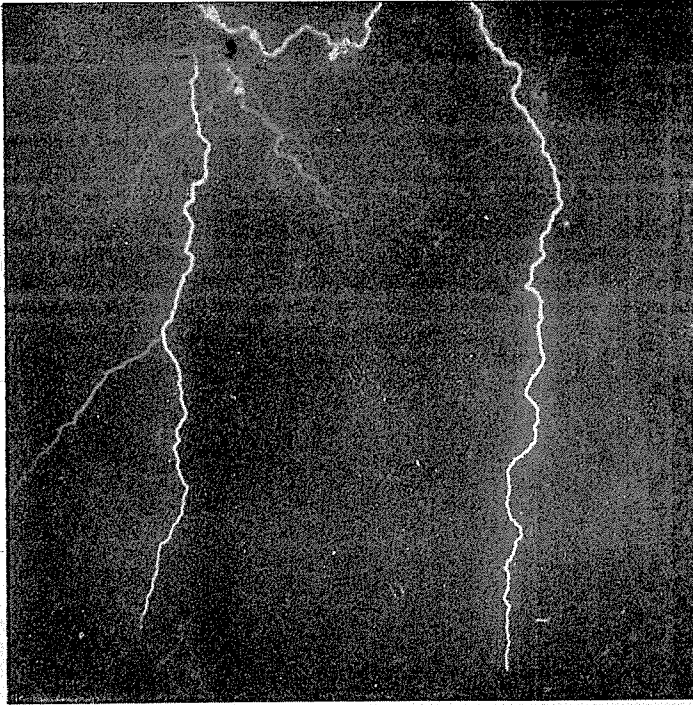


電光 8 第三閃光

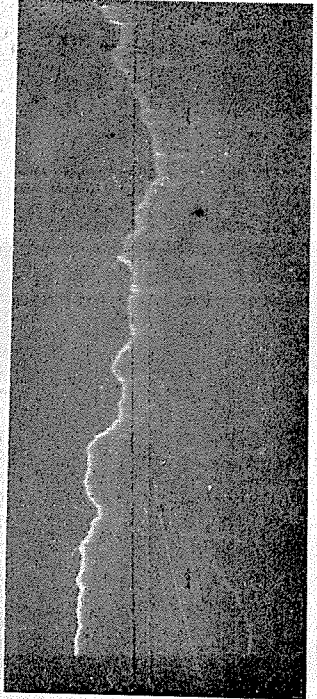


電光 9 第一閃光

No. 85



No. 87



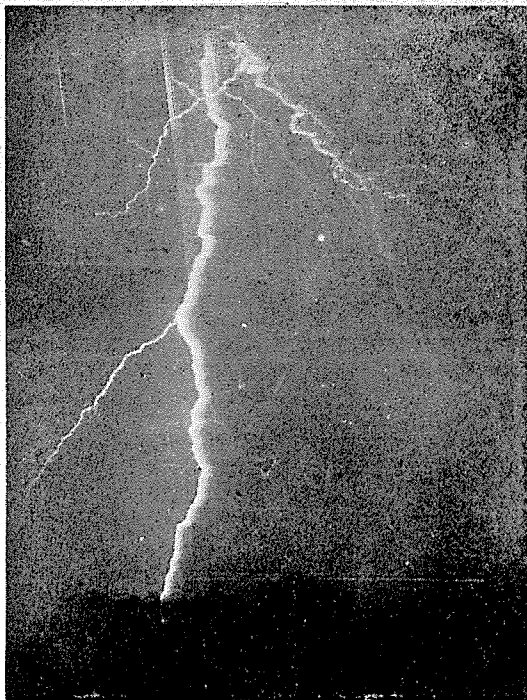
No. 86 L. 電光 1)

静止寫真

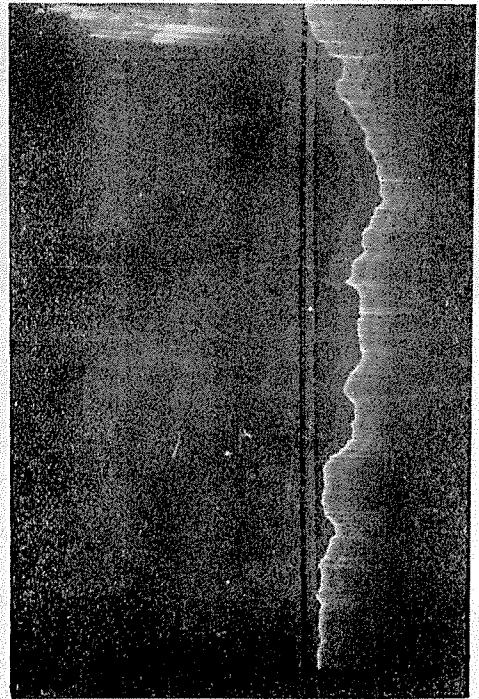
R. 電光 11

No. 88

電光 11 第一閃光

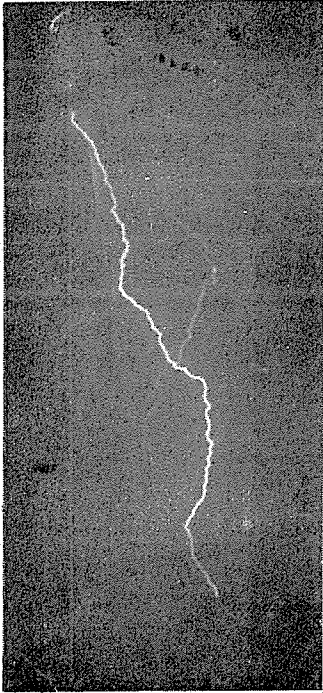


電光 10 第一閃光



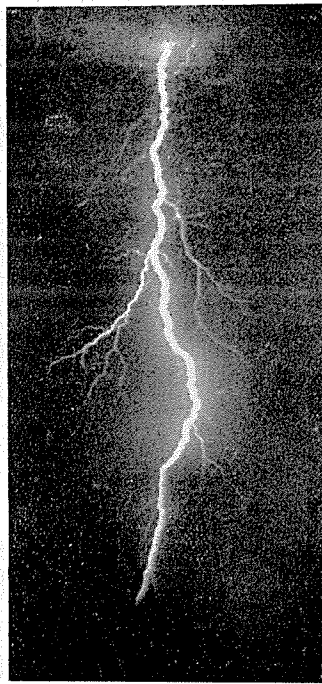
電光 11 第三閃光

No. 89



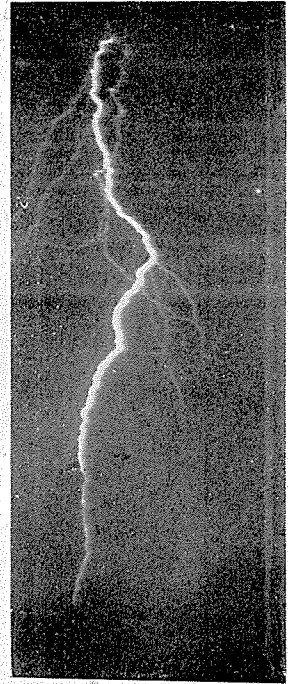
電光 13
No. 90 靜止寫真

Nn. 92

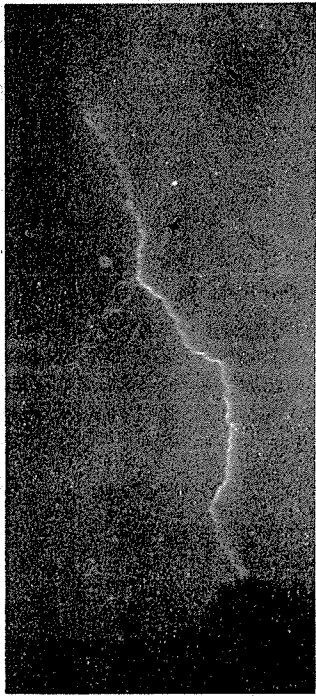


電光 14
No. 91 第一閃光

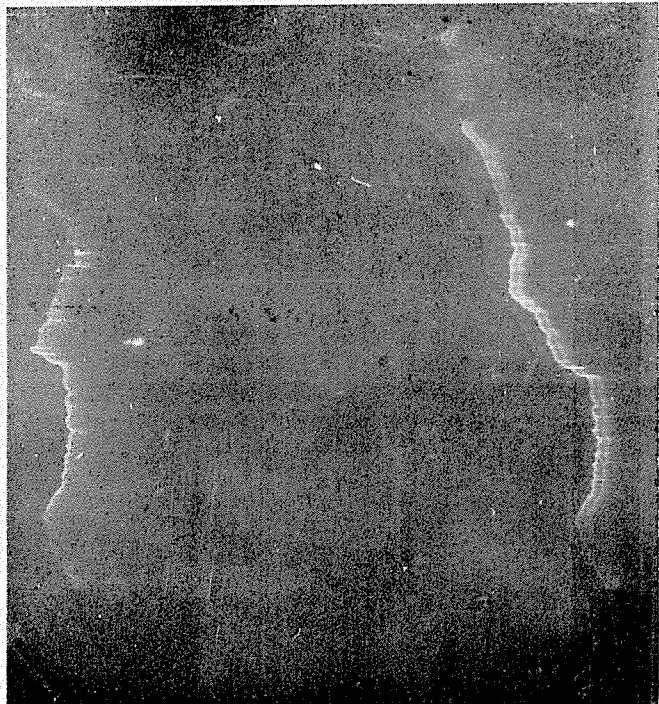
No. 93



電光 15 第一閃光

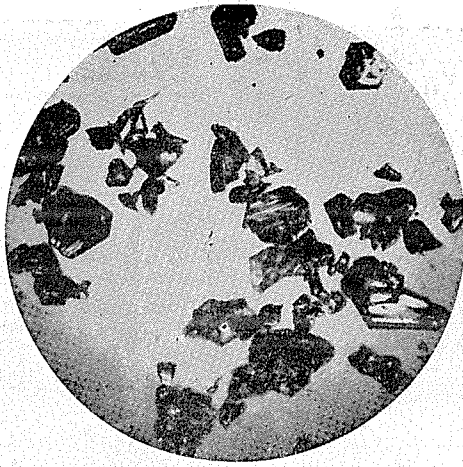


電光 13 第一閃光

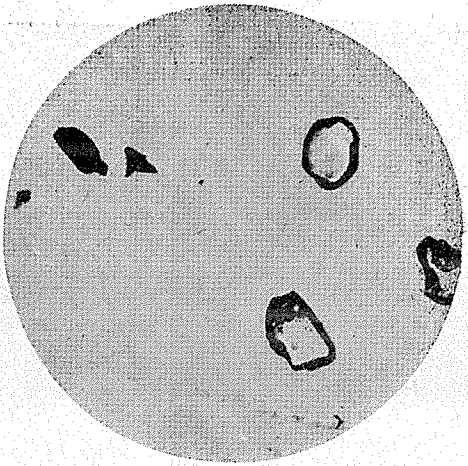


電光 13 第二閃光 第三閃光

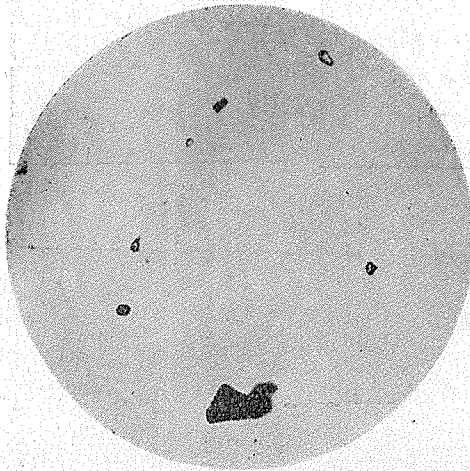
No. 95



No. 96

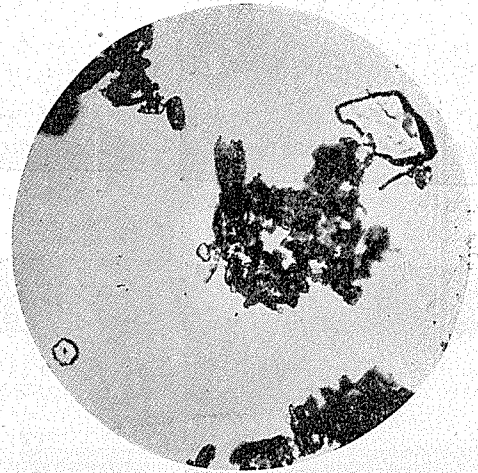


No. 97



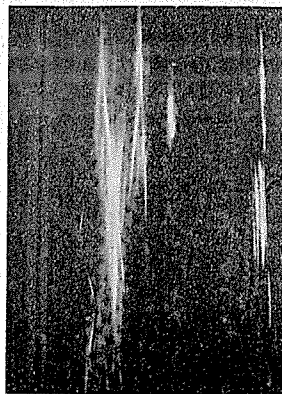
× 9.5

No. 98



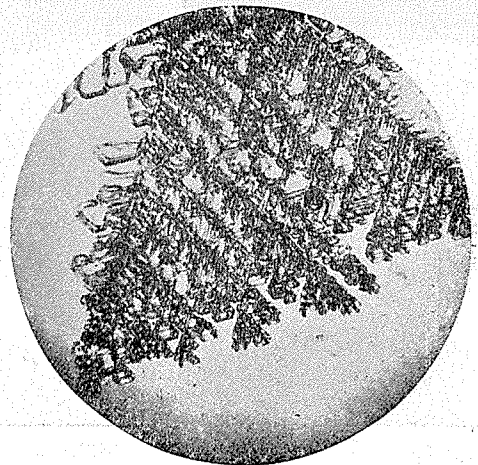
× 65

No. 99



× 65

No. 100



× 65

× 12.4

× 7.4