雪 片 の 荷 電 に つ い て

孫野長治*, 小口八郎**, 荒井文治***, 岡部 弘***

The Electric Charge of Snow Flakes

By C. Magono

Hokkaido University, Sapporo

H. Oguchi

Tokyo Art University, Tokyo

B. Arai and H. Okabe

Yokohama National University, Yokohama

(Manuscript received 17 January 1956)

Abstract

In the winter season of 1955, the electric charge of snow flakes was individually measured simultaneously with the atmospheric field intensity and the size of snow flakes, using a vacuum tube electrometer, Wulf's electrometer and filter papers respectively. The shape of snow flakes was also observed by the microphotographic method. The following results were obtained.

- i) When the field gradient was steep, the sign of charge on snow flakes was generally the opposite of that of the prevailing field. Under the weak field, the sign was changeable.
- ii) The steeper the field gradient and the larger the size of snow flakes was, the larger the charge on them was.
- iii) The charge was extremely large while the field gradient was rapidly changing, in other words, when the string which showed the gradient was vibrating. The vibrating phenomenon of the string may perhaps represent the existence of a strong turbulence.
- iv) No special relations were observed between the sign of electric charges and the crystal form.

Considering those results, it is supposed that the snow flakes carry electric charges mainly as a result of the selective ion capture under an atmospheric field similar to what happens in the case of raindrops, and on that mechanism are superposed the other effects, that is to say, the friction or disruption of snow flakes.

§ 1. 序 論

降雪の荷電は雷の発生機構にも関係するので、かなり前から多くの測定があるが、結果がまちまちである。たとえば J. Alan Chalmers¹⁾ や畠山久尚、川野実²⁾ によれば Simpson その他の 4 論文では降雪の荷電は正が多いとなつてゐるが、Elster, Geitel その他の 3 論文では負の方が多いと報告されている。この大きな不一致の原因を Simpson や Chalmers は、その時の気象状態の

相違に帰している。この論文の目的は雪片の荷電を左右する気象状態を調べるにある。中谷教授³⁾ の報告によれば通常は負に荷電した雪が多く、雲粒が附着すると正が多い。Schaefer⁴⁾ は空中電場に起因する尖端放電々流とその時の雪の結晶の状態を調べてゐるが、正電流（地面から正電流が流れるから空中電場は負に相当する）の時は乾いた結晶形の雪が降り、正負の電流が交錯するときは雲粒のついた湿つた雪が多量に降つてゐる。また結晶形と個々の雪の関係も調べてゐるが、はっきりした傾向は出てゐない。尖端放電電流と個々の荷電の同時測定のないのが惜しまれる。昭和

* 北海道大学理学部

** 東京芸術大学

*** 横浜国立大学

18 年 (1943) に畠山氏⁵⁾ は少数ながら電場 (空中電位傾度) と降雪の蓄積荷電との関係を調べて、電場の符号は荷電と反対符号のことが多いと報告されている。しかし個々の雪片の荷電との関係は論ぜられていない。

雨滴の荷電の符号は殆んど空中電場の符号と逆になつており、その荷電機構が空中電場による雨滴の静電誘導に起因することを暗示しているが、雪片の場合も同様なことが起らないであろうか。これを調べるためには個々の雪片の荷電とその時の空中電場との同時測定が望ましい。われわれはこの目的で昭和 30 年 (1955 年) 1 月下旬から 2 月上旬にかけて新潟県関山において、雪片個々の荷電、質量及び空中電場の同時測定をおこない、あわせて雪片の結晶形をも同時に撮影した。以後雪片というのは雪の結晶の集まりを指すが霰や霰状雪も含めることにする。当地では美しい単結晶が単独で降ることとはなかつた。

§ 2. 測定法

関山町五万戸の営林事業所の苗畑中の平坦地に第 1 図のような雪洞 ($2 \times 2 \times 3 \text{ m}^3$) を作つて観測を行なつた。雪洞の断面図を第 2 図に示すが、外部の電氣的障害の遮断は非常に良好で湿気も割に

第 1 図 観測雪洞
X 字型竹桿の右上端に電器がある

第 2 図

少かつた。苗畑の周囲に杉林があつて強風も避けられた。

a) 空中電場 (電位傾度) の測定

観測雪洞の風下約 20 m の積雪面上 2.5 m (積雪面は観測期間中には大きな変化はなかつた) の位置にラドン電器を取りつけ、これをビニール線で雪洞内の Wulf 式単粒電位計に導き (第 1 図参照)、絃のふれで電場の強さを測つた。補助電圧はそのときの空中電場の強さによつて ± 100 ボルト, ± 6 ボルト (何れも中央接地) とに切りかえて使用したが、スケールアウトを避けられないことがあつた。電器からの導線の絶縁部はろうそくを使つたが絶縁は良好であつた。電場の平面補正は施さなかつたが大體平面に近いと考えられる。装置の製作は主として荒井が当つた。

b) 雪片の荷電の測定

降つてくる雪片の取入口の上部は、雪片が取入口の周囲の積雪にふれないように摺鉢型に除雪し、また接触した形跡のあるものは除外することにした。しかし降雪の盛んな時や風の強い場合には、接触したものを若干見落したかも知れない。取入口の直ぐ下に廻転式の開閉板を設けて測定時だけ開けることにした。雪片が第 3 図に示すような荷電測定装置の受板にのせてある濾紙の上に降りこむと、直ぐに計器の目盛をよむ。同時に他

第 3 図

の一人が電場の方をよむ。一人で両方の読みをとるときには1分足らずのずれがあつた。

一般に荷電体を板等に直接うけて測る方法は種々の危険を伴なう。すなわち、今の場合は雪片が受板上で分裂したり摩擦したりするときに電気を発生する恐れがある。しかしわれわれの場合は電場のない時に降つた雪片の分裂した一方が受板から落下しない限り計器の針は動かなくなつたから、上に述べた心配はなかつた。荷電の検定法は後述する。

受板上に降つた雪片の荷電の測定回路は橋高氏⁶⁾の装置を微小電氣量でも測定できるように改めたもので第4図に示す。雪片の荷電によつて真空管 1R5 (パラフィン封じ) の第3格子の電

第4図

圧が変化する。これに応じて陽極電流が変るのを直流増巾してマイクロアンメーターで読みをとる。平時は読みを $50 \mu A$ になるように調節しておく、受板に正荷電がのれば $50 \mu A$ 以上を指し負荷電がのれば $50 \mu A$ 以下を示す。測定範囲は $10^{-4} \sim 10^{-2} e.s.u.$ で2段切り換えであつたが、この方もスケールアウトを避けられないことがあつた。

c) 荷電の絶対値の検定

球状体が孤立しているとき、その静電容量は半径に等しいから球状体の荷電量との間に次の関係が成立する。

$$Q = CV = rVe.s.u. \quad (1)$$

Q , C , V は夫々荷電, 電氣容量, 及び電位 (何れも $e.s.u.$), r は球状体の半径 (cm) である。そこで (1) 式を使い、種々の半径の水滴に種々の電位を与えて滴下させて荷電測定装置の受板上の

濾紙に落として、その時のマイクロアンメーターの読みと荷電の関係を検定した。しかし滴下装置の都合で水滴を無限遠に孤立させることが出来なかつたので静電容量に 10% 程度の誤差⁷⁾は見込まなければならない。滴下前の水滴を接地しておいた時にはマイクロアンメーターは殆んどふれなかつたからレナード効果は除去されている。検定の結果を第5図に示す。横軸はマイクロアンメーターの読み、縦軸の左目盛は低感度用 (黒丸実線)、右目盛は高感度用 (白丸破線) である。

第5図

水滴で検定した結果が雪にもそのまま使えるかどうかは問題であるが、濾紙は静電的には殆んど導体であり、事実、雪片が受板に落ちると瞬間的に指針が一定値を示し、それから徐々に元に戻るから、大きな誤差はないと考えられる。どちらかと云えば電氣漏洩が少なすぎて指針の戻りが遅いために観測の能率が上らなかつた位である。

d) 雪片の撮影

荷電の読み取り後直ぐに濾紙ごと撮影装置に移す。濾紙は撮影の便宜のために予め墨汁で染めてある。雪片の大きさにより接写または顕微鏡撮影装置を使つた。気温は零下でも雪洞内は $+1^\circ C$ 前後に上り、そのため光源に熱線吸収フィルターを使い、食塩の寒剤で撮影台を冷したが、撮影中に雪片が融けたり昇華することがあつた。

e) 水球換算半径の測定

雪片は上に述べたように撮影中またはその直後に濾紙上でとけたので、そのぬれた痕跡を鉛筆で印して水球換算半径を求めた。分裂した場合は合計して換算半径を出した。雪片がとけない場合は

濾紙の裏から指先で暖めてとかした。墨汁染めは暗視野照明と電気伝導度を良くするが、水をはじく性質があるので痕跡の半径を小さくする恐れがある。後で調べたところによると大水滴の痕跡は影響を受けなかつたが微小な単結晶や氷粒の場合は誤差は大きいであろう。しかし微小粒は撮影中の昇華の影響の方が大きい。いずれにしても痕跡の直径が 1 mm 以下の場合には信用できない。

§ 3. 測定結果

1 月 26 日夕刻から霰状雪または雲粒付の降雪があつたが、この時は電場も割合に強く、荷電もしばしばスケールアウトした。第 6 図にその結果(観測番号 No. 1)を示す。横軸は時刻で縦軸の右方の目盛は積雪面上の電位傾度の時間変化(実線)を示し、左方の目盛はその時刻に観測された雪片の荷電(黒丸印)を表わす。16 時頃から電場の符号は正となりしばしばスケールアウトした。

第 6 図

第 7 図

縦軸下方の S.O. はスケールアウトを示す。また電位傾度は盛に振動して瞬間値がよみとれなかつた。陰影部分は大体の振動範囲を表わす。このときの荷電は 10^{-2} e.s.u. 代で従来の結果^{2), 4)}よりも遥かに大きい。電場が正のときには荷電は負であり、電場が弱くなるに従い荷電も減少し符号関係もばらついてくる。

1 月 31 日は霰、霰状雪、雲粒付雪片が終日降りつづけた。第 7 図(観測番号 No. 2)、第 8 図(No. 3)、第 9 図(No. 4)にこの結果を示す。こ

の日は電場、荷電ともに小さいので電場目盛は No. 1 に比べて 5 倍、荷電は 50 倍に拡大してある。また下方の○印中の数字はその時刻に荷電を測つた雪片の写真番号である。写真は最後の図版に収めてある。この場合でも電場は殆んど正であり逆に荷電は大抵負である。また電場の強い時に観測される雪片の荷電は大きく、殊に電位傾度の振動している第 8 図(No. 3)の始めの部分では荷電が負の方にスケールアウトする位に大きい。電場が 0 に近づくと第 9 図のように荷電も

小さくなり符号もばらついてくる。雪片の結晶形の方は図版に示されている如く霰、霰状雪、厚板及び雲粒付樹枝が交互に混じて降っているが、結

晶形と荷電との間に特別の関係は見あたらない。もちろん本州中部では雲粒のつかない美しい単結晶は殆んど降らない。

第 8 図

第 9 図

§ 4. 考 察

雪は降水の初期段階にあたり、降水が電気発生に関係しているとすれば降雪の荷電は雨滴の荷電よりも雲中の電気発生の源に近いわけである。雪片の荷電を個々に測つた主な目的も、雪片荷電が雷雲中の正負電気の分離に如何に寄与しているかを調べるにあつた。われわれの観測でわかつた主な点は次の二つである。

- i) 電場の強い時には電場と雪片荷電の符号は大抵反対である。
- ii) 電場の大きい時には雪片の荷電も大きい。

この傾向は Wilson の雨滴荷電の電気誘導説を思わせるものがある。すなわち雨滴の場合は第 10 図に示す如く、たとえば空中電場が正の時には雨滴の下側が静電誘導で正に帯電するために、

地上の突起物から放電された大気中の負イオンだけを落下の際に撰択吸収するから、雨滴は全体として負に帯電する筈である。大気中のイオンが正負の中、一種だけの場合の雨滴の最大荷電量を

Chalmers⁸⁾は次のように計算している。

$$Q = -3Er^2 \text{ e.s.u.} \quad (2)$$

E は電場の強さ (電位傾度), r は雨滴の半径 (cm) である。すなわち雨滴の最大荷電は雨滴の大きさが定まっておれば符号は電場と逆で大きさは電場の強さに比例する。また電場が一定ならば荷電は雨滴が大きいくほど大きい。上に述べたわれわれの結果は (2) 式の関係とよく似ている。このことを更にはつきりさせるために雪片荷電と電場の強さ及び雪片の大きさとの関係を別々に調べてみよう。

a) 荷電と電場の関係

この関係を調べるには雪片の大きさの影響を除かなければならない。雪片の大きさは荷電に関係するとすれば (2) 式の如く表面積に比例すると一応考えられるから、電場の強さ E と Q/r^2 の関

第 11 図

第 12 図

係を調べてみよう。ここで r というのは濾紙法で測った雪片の水球換算半径である。第 11, 12, 13 図及び第 14 図は観測番号 No. 1, 2, 3 及び 4 を整理した結果である。(2) 式のように Q が $-E$ に比例するものならば縦軸 E に対して Q/r^2 は第 2, 第 4 象限に位置する筈であるが、第 11,

12, 13 図にはこの傾向が明かに見られる。殊に電場の強い第 11 図の場合は一層明瞭である。電場の弱い第 14 図の場合は第 1, 第 2 象限に等分に分布していて特別な傾向はみられない。

第 13 図

第 14 図

次に (2) 式のように Q が Er^2 に比例するものならば測点は原点を通って第 2, 第 4 象限を走る直線上に分布する筈であり、最大値に達しない場合はこの直線から縦軸よりに分布する筈であるが、われわれの場合はひどいばらつきようである。参考のために雨滴の場合の最大荷電を直線で示しておいたが、雪の場合は同じ電場に対する雨滴荷電よりも遥かに大きいことがわかる。このことは従来の観測結果⁹⁾や理論¹⁰⁾とも一致する。

b) 荷電と雪片の大きさの関係

電場の強さの影響を除くために a) の場合と同様な理由で Q/E と r との関係を第 6, 7, 8 図の分を収めて示したのが第 15 図である。 Q/E を採るので E が極端に小さな第 9 図及び E が 0 の場合は除いた。図でわかるように測定は破線の右側に大体かぎられている。このことは同じ電場に対して雪片が大きいくほど、その荷電も大きいこ

とを示している。またスケールアウトするような大きな荷電は水球換算半径が 0.8 mm 以上でないとみられない。逆に雪片が大きくても必ずしも荷電が大きいいとはいえないが、このことについては後でべる。大きさと符号には特別な傾向はみられない。

第 15 図

以上二つの傾向は電気誘導機構による荷電の傾向と非常によく対応している。ここで問題は電場で雪片の荷電の符号が定まるのか、それとも雪片荷電が電場を作るのかということである。もしも雪片荷電の降下が電場の原因ならば強い降雪のある時は必ず強電場を伴いそうなものであるが、実際は連続降雪でも強電場を作らないことが多い。逆に電場が荷電を左右するものならば荷電の符号は常に電場と逆であり、大きさは雪片の表面積に比例する筈であるが、中谷教授の観測や、電場の弱い場合のわれわれの結果からわかるように正負に荷電した雪片が混じって降ってくる。大きさも第 10 図にみられるように大体の傾向は一致するが、しかし大きなばらつきがある。従つてわれわれは電場の強い場合は静電誘導によつて雪片が荷

電され、この他に雪片相互の摩擦などの発電機構が重なるのではないかと考える。したがつて電場の弱い場合は符号にばらつきがあるのであろう。第 15 図で雪片が大きくても必ずしも荷電が大きくないのは、電場は急変することが多いので荷電が最大値に達していないためと考えれば説明がつく。

従来雪の荷電は正が多いか負が多いかが問題とされて来たが、上のように考えれば降雪の際の空中電場の符号の方を先議しなければならない。中谷教授は雲粒付の時は正荷電が多いとされているが、われわれの観測では雲粒付か霰のみの降雪でしかも負が圧倒的に多かつた。これも降雪時の電場の符号の相違であつたと考えれば諒解される。Schaefferr の結晶形と符号との関係の不規則なものやはり電場の影響であろう。雪の結晶形と荷電の符号に規則性があるとするれば、それはその結晶形の雪を降らせるような雲の作る電場と雪の荷電の符号とが直接に関係しているのであろう。極端に言えば、雨滴や雪片でなくても何でも強電場中を降りさえすれば荷電をもつてくるのではなからうか。もつとも一定符号の荷電を持つて雪が降下すればその結果その時の電場が益々強められることはもちろんである。

空中電位傾度が振動している時は、傾度がそれほど強くなくても雪片の荷電が極端に大きいことは、直接に雲中の電気発生に関係していると思われるので注目すべきであろう。

§ 5. 要約と結言

雪片個々の荷電の絶対値を、その時の空中電場、雪片の質量及び撮影の同時観測をおこなつて次の結果を得た。

- i) 電場の強い場合には、電場の符号はその時に観測された個々の雪片の符号と逆のことが多い。電場の弱い場合には符号はまちまちである。
- ii) 電場の強い時ほど荷電も大きく、また雪片が大きいほど荷電も大きい傾向がある。
- iii) 電位傾度の振動中は荷電は極端に大きい。
- iv) 雪片の結晶形と荷電との間に特別な関係はみられない。

以上の結果から雪片の荷電機構は次のよに考え

られる。

雪片は大筋として静電誘導によるイオンの選択付着によつて荷電するのであり、これに他の原因が付加している。結晶形と荷電の関係はあるとしても間接的なものであつて、その結晶形の雪を降らせるような雲の作る電場が荷電を左右するのである。

この観測にあたり関山の五万戸事業所の使用を許可された高田営林署、現場で種々の便宜を与えられた中村、渾川の両氏に深甚の謝意を表わす。また荷電測定回路に助言を賜つた東京芝浦研究所の吉田氏、観測を援助された中山氏に感謝する。

本研究は文部省の科学研究費によつて行われたものである。

文 献

1. Chalmers, J. Alan (1949): Atmospheric electricity, Oxford Press, London, p. 116.
2. 畠山久尙, 川野 実 (1955): 気象電気学, p. 173 岩波
3. 中谷宇吉郎 (1949): 雪の研究, p. 63 岩波
4. Schaefer, J. Vincent (1947): Properties of particles of snow and the electrical effects they produce in storms, Trans, Amer. Geophys. Union, Vol. 28, p. 587.
5. 畠山久尙 (1943): 降雪の際の電位傾度, 雪片の電荷とその関係, 雪氷, Vol. 5, p. 315
6. 橘高重義 (1953): 静電気測定器の試作について, 応用物理 Vol. 22, p. 278
7. Phillips, B.B. and Ross Gunn (1954): Measurements of the electrification of spheres by moving ionized air, Jour. Met. U.S.A. Vol. 11, p. 348.
8. Chalmers, J. Alan (1944): On Wilson's theory of the collection of charge by falling drops. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., Vol. 70, p. 103.
9. 岡田武松, (1951): 雨, p. 116 岩波
10. Chalmers, J. Alan (1949): Atmospheric electricity, Oxford Press, London, p. 157.

No. 2

No. 3

No. 4