雷雨の雨滴荷電と空中電場について

孫 野 長 治・岡 部 弘

On the Electric Charges of Single Raindrops and Surface Field Intensity under Thunder Clouds

By C. Magono

Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo

and H. Okabe

Faculty of Liberal Arts, Yokohama National University, Yokohama

(Manuscript received 31 August 1956)

Abstract

Electric charges of single raindrops were simultaneously measured for their sizes and surface field intensity under thunder clouds at Kiryu and Yokohama. It was found that a definite inverse relation between the signs of charge and field existed in Japan also, except during the short period when the sign of the surface field changed. The reason of this exception was considered as follows. During the period when the sign of field changed, the field intensity was almost zero. Therefore, the charges of falling raindrops suffered no charge deformation as a result of the capture of ions according to Wilson's theory.

Considering the phenomena, one can explain the wide divergencies observed in the relation between charge and field. To examine Smith's calculation, it is desirable that the charges of many raindrops be observed within a short period in which the field intensity is considered to be constant.

§1. 序 論

雨滴の荷電は雷発生機構や空中電気の平衡を調べる時の重要な手懸りになるので Elster & Geitel 以来多くの測定¹⁾があり、雨滴の個々の荷電が測れるようになってからも、地上観測では Gschwend²⁾, Chalmers & Pasquill³⁾, Hutchinson & Chalmers⁴⁾, Smith⁵⁾, や Gunn⁶⁾, 航空機によるものでは Gunn & Devin⁷⁾ の報告がある。これらの測定にもとづいて、雨滴の荷電機構として Simpson の水滴分裂説と Wilson の誘導説が主として考えられている。しかし前者は空中電場と雨滴の荷電の符号が逆のことの多い事実を説明できないし、後者は符号の関係は説明できても Chalmers¹⁰⁾ の指摘しているように電場との関係を説明するのに数十倍のくい違いがある。同一人の測定値にでも符号も含めて非常なばらつきがあるので、上の二説だけで完全にかたづけとは考えられない。従来報告は平均に重きをおきすぎているようであるが、平均で論じるにはあまりにもばらつきが大きいので、何か別の機構が加わっているのではなからうか。ばらつきの原因を調べる

には時間的变化に注目するのも一つの方法であろう。また水滴分裂、誘導のどちらの機構にしても空中電場の同時測定が重要であるから、われわれは両者の時間的变化に着目して 1954 年の夏から秋にかけて桐生と横浜で雷雨からの 159 ケの雨滴の荷電を観測した。

雨滴の荷電の観測は珍しいことではないが、この種の観測は地球上で広範囲に行われることが望ましいことと、時間的变化で若干の知見がえられたのでとりあえず報告する。

§2. 測定装置

i) 空中電場

林に囲まれた広い開地に空中線として地上 1 m と 5 m の高さに裸銅線を Fig. 1 のように張り、これを Hankel 型の電位計に導いて地表との電位差をはかった。空中電場の強さによつて空中線と電位計の補助電圧をきりかえた。集電器はつかわなかつたが、雷雨が近づけば銅の空中線だけで充分電場の変動が表れた。空中線をきりかえる時に火花がとんだ位である。電位計の目盛の検定は空中線附近をろうそくの炎でイオン化して行つた。

* 北大理学部, ** 横浜国大学芸学部

Fig. 1. Apparatus for measuring surface field intensity.

この時の係数は 20 倍である。この係数は大きいので精度はあまり良くないが、大体の傾向を知るにはこれで充分である。空中線の支持部の絶縁も雪片¹⁴⁾の場合と同様に大型のろうそくを使用した。絶縁は充分であるが日射のために軟化したこともあるのであるべく白色のものがよい。日射の雨よけのために覆をつけたほうがよかつたかも知れない。

平面更正是施さなかつたが大體平地と考えてよい所である。以上を考慮して空中電場の測定誤差は 10 割程度と考えられるので量的に精密な議論は避ける。

ii) 雨滴の荷電の測定

荷電の測定装置は雪片¹⁴⁾の場合と同様に真空管 1R5 の第 3 格子につないだ受板に雨滴を 1 ケだけ受け、このために生じた陽極電流の変化を直流増巾して読みをとつた。雷雨のためか荷電量は 10^{-2} esu 程度に大きかつたので測定が容易であり指針の戻りも速いので 30 秒に 1 ケの割合ではかることができた。電気量と陽極電流計のふれとの検定も雪片の場合と同様、既知の電圧と大きさを持つ水滴を孤立したところから終端速度でおとして行なつた。水滴は雨滴と全く同じ状態で落ちるので精度もよく問題も少い。雨滴荷電の測定誤差は 1 割内外と考えられるので空中電場に比べれば充分な精度である。

iii) 雨滴の質量

受板上に東洋沝紙 No. 1 (径 7 cm) をおいて痕跡から雨滴の大きさを求めた。沝紙は雨滴の分裂を防ぐ効果もあり、検定の結果によればレナード効果も無視できる程度であつた。

§ 3. 測定結果

雨滴の荷電、大きさ及び電場の関係については種々の見かたがあるので生の観測結果を Tables I—IV に示す。

Table I. Obs. No. 1. Thunderstorm at Kiryu 11.56—12.32 1 Aug. 1954.

Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm	Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm
1156	+28	+0.3	0.8	1223	-30	+ 5.4	2.2
1202	+28	-1.0	1.0	25	-68	+26	3.5
10	+14	-1.0	1.3	30	-32	- 1.0	1.2
17	-56	+3.5	1.3	32	+10	- 1.0	1.4
20	-30	+5.3	2.0				

Table II. Obs. No. 2. Thunderstorm at Kiryu 16.03—16.52 5 Aug. 1954.

Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm	Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm
1603	-20	-0.1	1.4	1627	-68	+1.1	1.5
035	-32	-1.3	1.2	28	-94	+2.8	1.7
04	-64	-4.6	1.9	30	-96	+6.3	2.0
05	-40	-0.6	1.3	32	-96	+0.5	1.8
07	+34	+0.3	1.7	38	-80	+0.8	2.0
08	+43	+0.3	1.7	39	-80	+0.7	1.7
10	+67	-2.7	1.6	41	-74	+0.5	1.4
13	+24	-1.3	1.6	42	-50	+0.3	1.7
15	+38	-0.1	1.5	43	-50	-0.1	1.1
16	+56	-0.9	1.4	44	-20	+0.4	1.6
17	+14	+1.4	2.2	45	-20	+1.0	1.0
18	-48	-1.8	1.5	46	-20	+1.0	1.1

(To be continued)

Table II.

(Continued)

Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm	Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm
1619	-60	-2.6	1.4	1647	-21	-0.4	1.5
20	-68	-0.9	1.3	48	-21	+0.4	1.7
22	-66	-3.5	1.7	49	-21	0	1.0
23	+24	+0.9	1.4	50	-10	0	1.5
24	-68	+1.6	1.8	51	0	0	1.0
26	-96	-2.4	2.1	52	+ 8	0	1.0

Table III. Obs. No. 3. Thunderstorm at Yokohama 12.19—19.01 17 Sept. 1954.

Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm	Time	Field v/cm	Charge 10^{-2} esu	Diameter mm
1219	+ 0	-0.8	2.1	1320	- 0	+1.4	2.0
21	+ 0	-0.3	1.4	22	-46	-0.1	1.6
22	+ 0	+0.6	2.2	24	-30	+0.8	1.9
25	+ 0	+0.3	2.2	25	- 5	0	2.0
28	+29	+0.6	3.1	27	- 0	-0.9	1.4
30	-34	+0.6	2.3	29	- 0	-0.3	2.4
31	+11	+1.3	1.6	31	- 0	+0.9	2.2
32	+29	+0.7	1.4	33	- 0	+0.2	1.6
34	+10	+7.9	3.4	35	- 0	+0.2	1.6
35	-42	+1.8	1.3	36	- 0	-0.6	1.6
36	-56	-0.2	2.1	37	- 0	-1.4	1.9
37	-35	-0.2	1.3	39	+ 0	-1.5	1.9
39	-56	-0.6	1.5	40	+ 0	-0.6	1.6
40	- 0	+0.1	1.5	42	+11	+0.7	1.6
42	-56	-0.1	1.9	44	-54	-0.9	1.6
45	-56	-1.6	1.7	46	-59	+0.2	1.9
46	-44	-0.1	1.9	47	- 0	+0.1	1.6
47	-50	-0.6	2.1	1406	- 0	-0.6	1.5
48	-34	-2.9	3.1	08	+13	-0.2	0.9
49	+10	+0.3	1.6	27	- 0	+2.8	2.8
50	+12	-0.1	1.4	28	- 0	+3.0	3.0
51	+12	+1.2	1.5	29	- 0	-1.6	2.6
52	+11	+0.3	1.5	30	- 0	+2.2	2.4
53	- 4	+1.2	1.0	32	- 0	+1.4	2.4
54	-35	+0.1	1.0	33	- 0	+1.8	2.4
56	-34	+0.1	1.0	34	- 0	+3.5	2.8
57	-50	+0.1	0.9	35	- 0	+3.1	2.4
58	-64	-0.1	1.2	36	- 0	+1.4	1.5
59	-54	0	0.7	38	-70	+0.6	1.1
1301	-35	0	1.1	40	+14	+0.3	1.9
02	-53	-1.8	2.2	41	- 0	+0.3	2.1
03	-58	-0.3	1.9	45	- 0	0	2.0
05	-36	0	1.6	46	-47	+0.1	1.6
07	-74	0	1.4	48	-55	+2.1	3.0
11	- 0	+0.6	1.5	57	-34	+1.4	1.7
13	- 0	+0.7	1.4	1858	-37	+1.1	2.8
15	+34	-1.4	1.5	59	-47	+0.5	1.9
16	+ 0	-8.0	2.0	1900	-41	+0.3	1.9
18	+ 0	-5.5	2.1	01	-39	+0.1	2.0
19	+ 0	+1.4	1.6				

Table IV. Obs. No. 4. Typhoon 14 at Yokohama 20.05—22.26 18 Sept. 1954.

Time	Field v/cm	Charge 10^{-3} esu	Diameter mm	Time	Field v/cm	Charge 10^{-3} esu	Diameter mm
2005	-40	+0.4	1.5	2040	0	0	1.4
06	-32	+2.5	2.3	2111	-42	0	2.0
10	-59	+4.0	1.8	16	-10	0	1.4
11	-54	+4.0	2.2	18	0	0	1.2
13	-70	+5.5	1.4	20	0	0	1.5
15	-39	+2.5	2.1	24	-10	0	1.5
16	-30	+2.5	2.4	26	0	+0.4	2.0
18	-74	0	1.7	30	-59	+1.0	2.0
20	-39	+0.4	1.5	33	-40	+2.5	2.4
23	-65	+2.5	2.1	35	-40	+0.4	1.2
25	-S.O.	+4.0	2.1	40	+40	0	1.7
27	-28	0	1.7	41	+40	0	1.3
29	-32	+2.5	2.1	2214	-13	0	1.4
30	-40	+0.4	2.5	15	-53	+2.5	2.3
31	-52	0	1.9	24	-40	0	2.3
34	-30	0	2.2	25	-24	0	1.5
36	-44	0	1.7	26	-11	0	1.7
38	-10	+1.0	1.4

Figs. 2 and 3. Charges on single drops (black dots) and surface field intensity (solid line) as a function of time.

Marks $\odot$ represent charges observed for the period of 2 min. when the sign of a filed reversed. Numbers attached to black dots show diameters of raindrops in mm.

Fig. 2 は 1954 年 8 月 1 日、桐生市における雷雨の一例 (Table I, Obs. No. 1) である。横軸は時刻で黒丸印が雨滴の荷電 (数字は直径 mm) を示し、実線はその時の空中電場である。最初、雨滴が弱い負の荷電をもっていたが、その時の電場は正 (上空が正) であり、電場が負にかわると正荷電の雨滴が観測された。一方、電場が強いほど、また雨滴が大きいほど荷電の大きいことがわかる。

Fig. 3 は同じく 8 月 5 日 (Table II, Obs. No. 2) の雷雨である。始の正電場 (16 時 5 分—15 分) の時には負の雨滴、後の負電場の山 (16 時 20 分—50 分) では正の雨滴が観測された。後者の負電場の山は雷雲の中の一つの Cell の消長を表わすものであろうか。Obs. No. 1 と異なるのは、電場の符号が転換する前後に観測された雨滴の荷電の符号は電場符号と一致するのが多くみられたことである。電場符号転換時の前後 2 分以内に観測した荷電は特に $\odot$ 印で示してある。9 月にはいつてから横浜市で観測をおこなった。

Fig. 4 は横浜の前線性の雷雨 (Table III, Obs. No. 3) の例であるが電場符号の交錯の烈しい点を除けば桐生の夏の雷雨と同じような傾向である。以上の 3 例を通じて雷雲からの雨滴の荷電は 10^{-2} eus 単位で、従来の観測値と変っていない。

Obs. No. 3 の翌日、台風 14 号 (1954) が

Figs. 4 and 5. Charges on single drops (black dots) and surface field intensity (solid line) as a function of time.

来襲した。Fig. 5 (Table IV, Obs. No. 4) がその時の結果で雷雨ではなく、荷電も前の例に比べて1桁小さい。また電場は常に負で、荷電はほとんど正であった。これが通常の降雨の型と思われる。以上の4例を通じて空中電場変動の周期は大づかみにいつて40分～60分であり、所謂 Wave Pattern²⁾ よりも少し短い同様なものであろう。

§4. 考 察

i) 雨滴の荷電と空中電場の符号

Figs. 2～5 に示されているように、空中電場の符号の転換時を除けば、荷電と電場の符号はほとんど逆である。この事実は欧州の多くの観測者¹¹⁾ によって注意されたことであり、吾国でも戦前の前橋の雷雨観測の畠山³⁾ の報告にも述べられているが、この符号の逆関係は Wilson の誘導説に非常に有利にみえる。

そこで符号だけでなく電場との関係を量的に調べてみよう。この場合、雨滴の大きさによる影響を除く必要があるから、雨滴の単位表面積あたりの荷電と電場の強さの関係を調べてみる。

Figs. 6～9 は前述の4例をいまの方法で整理したもので、縦軸が単位表面積あたりの荷電 ($\odot$ 印は電場符号転換時)、横軸が地表で測った空中電

Figs. 6 and 7. Relation between $Q/4\pi r^2$ and surface field intensity E .

場の強さである。Fig. 6 では2ケの例外はあるが、測点は原点を通つて第2, 第4象限にのびる直線上につけている。これは、大きさの影響を除けば、荷電と電場の強さの間には符号は逆であるが大きさは比例する関係のあることを示すものである。この時は測定値が少な過ぎるが、Figs. 7, 8 でも $\odot$ 印を除けば同様な傾向がみられる。Fig. 9 では測点は第2象限だけに集中しているが同傾向である。次に Wilson の誘導機構を基にして計算した下記の Whipple 等¹³⁾ の式と量的に比べてみよう。

$$Q = -3Er^2 \quad (1)$$

Q は電場の強さ E の空気中に同符号のイオン

だけが存在する時に、この中を落下する半径 r の雨滴のもつ最大電氣量である。正負イオンが等量存在するときは

$$Q = -0.5Er^2 \quad (2)$$

になる。(1) 式を図示したのが Figs. 6~9 の実線である。これと比べてみると、荷電の観測値は

Figs. 8 and 9. Relation between $Q/4\pi r^2$ and surface field intensity E .

Fig. 9 の場合を除けば計算値より数倍大きい。これを空中電場や荷電の観測誤差のみによるものとは考えられない。

計算値よりも観測値が遥に大きいということは雲底直下の空中電場が地上で測った電場より強いことに相当する。この通りならば Chalmers¹⁰⁾ の提出した疑問への好い答になるわけであるが、測定精度をもつと高めてからでなくては断定できない。

ii) 観測値のばらつき

Figs. 6~9 でみられるように、一般には測点が第 2, 第 4 象元にあり、電場転換時には反対に第 1, 第 3 象元に集まる傾向が顕著である。これは理由のあることに相違ない。この理由について考えてみよう。

a) 荷電と電場の観測時刻のずれ

荷電のよみをとつて記録した直後に電場を測つた。この間のずれは最大 1 分、平均 20 秒くらいであつた。

いま簡単のために電場が Fig. 10 の実線で示すように周期 60 分の $\sin$ 曲線で変動し、これに応

Fig. 10. Charge and field intensity as a function of time. Black dots show the sign of charge same as that of field, white dots, different sign.

じて雨滴 (大きさ一様と仮定) の荷電は (1) 式の関係で変つてゆくものとする。かりに電場のよみが誇張して 5 分間おくれたものとすれば電場は Fig. 10 の波線の如く記録される筈である。この場合、図の白丸印で示す如く、記録された見かけの電場が正に変つた直後 5 分間内に観測された雨滴は正荷電でその時の電場の符第と一致する。同様に電場が負に変つた直後にも同符号の負の荷電がみられる筈である。しかし Figs. 3, 4 にみられるように実測の場合は同符号荷電は電場転換時の前後にばらついている。また Fig. 10 からわかるように、5 分のおくれでも、同符号と観測される荷電の大きさは逆符号の場合よりも遥に小さい。実際のおくれは 1 分以内であるから、雨滴の大きさに変動があつたにしろごく小さい筈である。ところが Figs. 3, 4 の同符号の荷電は逆符号のものと同程度である。大きさを考慮した Figs. 7, 8 でみると同符号の方が反つて大きいくらいである。したがつて観測時刻のおくれのためとは考えられない。

b) 電場と荷電現象間におくれが実際に存在する場合

この場合も a) 同様に電場符号の転換時に同符号の雨滴が観測されることになる。Figs. 2~4 でみると電場と荷電は半周期 20 分程度の変動でも

忠実に逆符号関係で追従しており、位相におくれがあつたにしても観測値からは一応は数分と考えられる。絶縁のよい空气中で粒子の荷電は1時間で $1/e$ にまで放電¹⁵⁾するが、雷雲下では雨滴の荷電は補給がなければ数分で放電してしまうであろう。また雨滴が雲底でイオンを吸着しはじめる高さは Chalmers¹²⁾ の計算によれば 800~1000m であるから、地上に達するまでの時間は、2, 3 分である。このように荷電のおくれが 2, 3 分とすれば a) で述べたと同じ理由で、同符号と逆符号の荷電が同じくらいであるという実測の説明が難しくなる。もし位相のおくれが $\pi/4$ (時間で 15 分) ならば同符号の大荷電の雨滴が観測されることになるが、それならば Figs. 2~4 で、そのおくれが見られそうなのである。しかし兎に角、2, 3 分のおくれを問題にするには雨滴荷電の観測速度をもう少し増さなければなるまい。

c) 電場の転換時に観測された同符号に対応する気象現象が上空で実際におきる場合。

たとえば雷雲下部の負電荷の雨滴や *p*-charge¹⁶⁾ 部から Simpson 水滴分裂により正に荷電した雨滴が丁度電場符号の転換時に落下すれば、電場の影響を受けないでそのまま地上に到達すると考えれば一部の実測が説明される。

d) 雨滴の荷電には影響しないが、地上の電場を支配するような現象による場合。

雨滴の飛沫による空間電荷が地上附近にたまることも考えられるが⁷⁾、雷雲による電場に打勝つほど強いものであろうか。これを確めるには地表からもつと離れたところで電場を測る必要がある。

a), b), c) 及び d) の何れにしても電場、荷電、測時の測定精度を高め、観測例ももつと集積してから改めて検討したい。ただ Gunn⁸⁾ の結果の如く荷電が電場の符号に無関係にばらつくような場合でも、電場符号の転換時に注意すれば更に事情がはつきりするのではないかと考えられる。

電場の変化と荷電の変化は、どちらが原因であるかはわからないが、電場符号の転換時を除けば、逆符号関係で非常によく追従しあっている。したがって雨滴の荷電の正負いづれが多いかを論じるには電場の正負も合せ考える必要があろう。Smith⁷⁾ は雲底から雨滴が落下し始める時の荷電(表面積に比例)が途中で Wilson の誘導機構で反対符号のイオンを吸収するために変化する状態を、雨滴の大きさの函数として計算した。定性的に要約すれば、大雨滴は速く落下するから元の符号の電気を残して地表に到達するが、小雨滴はおそいから途中で符号が変わってしまう。微小雨滴の荷電はいずれにしろ零に近い。彼の計算した雨滴の荷電と大きさの関係は Fig. 11 の実線のような形をとる。これに他の原因が加わつてばらつれば

Fig. 11 の破線のように正負に拡がる。彼の計算と比較のために Obs. No. 2 を大きさと荷電の関係で図示したのが Fig. 11 である。図でみると雨

OBS. NO. 2

Fig. 11. Relation between diameters and charges observed when surface field was negative. Dashed dots show the values observed when the sign of a field reversed.

OBS. NO. 3

Fig. 12. Relation between diameters and charges. White dots represent the values when the field was negative, and black dots, when positive.

滴が大きいほど荷電も大きいが符号は正負等分にはばらついている。ただ電場の転換時のものをダッシュで区別すれば図の破線の範囲に収まり、如何にも雲底を出発する時に正電荷だった雨滴が途中に変化したようにみえる。しかし Obs. No. 2 では電場が正、負に変つていたからみかけだけでは論ぜられない。Fig. 12 は Obs. No. 3 の電場が正の時の荷電を黒丸印、負の時を白丸印、転換時にはダッシュを附して区別して表示したものであるが、転換時に極端に大きい荷電の雨滴がみられたという他には特別の傾向はないようである。Smith のあげた例では 3~4 時間ごとに区切つて観測結果を整理しているが、その間に電場の符号に変化はなかつたであろうか。彼の計算を観測で検討するには電場に変化のないことが必要で、できれば一時に多数の雨滴の荷電を測ることが望まれる。

この観測は筆者等が横浜国大在任、在学中に行われたものである。桐生市での観測にあたっては群馬大工学部の忍足舜吾氏に多大のお世話にあづかつた。記して深く謝意を表わす。本研究は文部省科学研究費で行われたものである。

References

1. 畠山久尙, 川野実 (1955): 気象電気学, 岩波, 166.
2. " " " 78.
3. " " " 98.
4. Gschwend, P. (1920): Beobachtung über die elektrischen Ladungen einzelnen Regentropfen und Schneeflocken. Jb. Radio akt., **17**, 62-79.
5. Chalmers, J. A. and F. Pasquill (1938): The Electric Charge on Single Raindrops and Snowflakes. Proc. Phys. Soc. London, **50**, 1-16.
6. Hutchinson, W. C. A. and J. A. Chalmers (1951): The Electric Charges and Masses of Single Raindrops. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., **77**, 85-95.
7. Smith, L. G. (1955): The Electric Charge on Raindrops. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., **81**, 23-47.
8. Gunn, R. (1947): The Electrical Charge on Precipitation at Various Altitudes and Its Relation to Thunderstorms. Phys. Rev., **71**, 181-186.
9. Gunn, R. and C. Devin (1953): Raindrop Charge and Electric Field in Active Thunderstorms. Jour. Met. **10**, 279-281.
10. Chalmers, J. A. (1949): Atmospheric Electricity. Oxford, 99.
11. Chalmers, J. A. (1949): Atmospheric Electricity. Oxford, 113.
12. Chalmers, J. A. (1951): The Origin of Electric Charge on Rain. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., **77**, 249-259.
13. Whipple, F. J. W. and J. A. Chalmers (1944): On Wilson's Theory of the Collection of Charge by Falling Drops. Quart. Jour. Roy. Met. Soc., **70**, 103-118.
14. 孫野長治, 他 (1956): 雪片の荷電について. 気象集誌, Ser. II, 34, 41-49.
15. Wössner, R. H. and R. Gunn (1956): Measurements Related to the Fundamental Processes of Aerosols Electrification. Jour. Colloid Sci., **11**, 69-76.
16. Schonland, B. F. J. (1953): Atmospheric Electricity, Methuen, 60.