

帯電霧と水滴及び氷滴の電氣的相互作用

——電雲の電氣的構造シミュレーション実験——

松田 正樹, 加藤 敏秀, 上村 伸, 北村 岩雄, 池田 長康

Electric interaction between charged fog and water and ice drops

——Simulation experiments of the electric structure in a thundercloud——

Masaki Matsuda, Toshihide Kato, Shin Uemura,
Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda

Experiment on electric interaction between charged fog and ice drops as the indoor simulation for the electric structure in a thundercloud is carried. The charged fog as a substitute for the charged cloud is used in this experiment. The electrification of water and ice drops passing through the charged fog in the various situation are measured in the experiment. At a result, it is found that water and ice drops have electric charge with both various polarities which depend on the separation conditions of water and ice drops at its moment.

キーワード：雷雲, 帯電霧, 帯電雲, 帯電降雨, 空間電荷密度, 印加電圧.

1. まえがき

現在停電のほとんどが落雷によるものであるといわれている。そのため、各電力会社および電力関係者は落雷の予測と避雷に全力をあげている。この雷に関する諸現象への対策を立てるにあたり、落雷のメカニズムや雷雲の発達過程の構造を解明することは重用であると考えられる。にも拘わらず、雷雲の諸現象は雄大でかつ何時どこで発生するかわからないということから、それに関する情報は限られたものしかない。

そこで、我々は実験室内でシミュレーション実験を行い雷雲の電氣的構造を解析しようと考えた。

雷雲からの降雨には電荷を持った雨滴及び氷滴が観測されている。しかし、この電荷がどこでどのような電氣的状況で帯電したのかは判明していない。そこでまずこの雨滴、氷滴、が帯電する状況がどのようなものなのか、帯電した雲と電荷を持った降水及び氷滴（以後帯電降水及び帯電降水と呼ぶ）との電氣的相互作用をシミュレーション実験を行い解析することを考えた。

2. 実験装置

2.1 実験装置

水滴及び水滴と帯電霧の相互作用を調べるために、図1に示すような装置を考えた。この装置では、帯電した雲の代わりに帯電した霧を使用した。この実験では、底面が1×1 m、高さが2.6 mの箱の中にこの帯電した霧を充満させる。そして、その箱の上部に設置したノズルから水滴、あるいは氷滴を落下させる。この水や氷滴は霧の内部から箱の下部に空いた穴を通過し、箱の下に設けられた碍子の上にのせた導電性容器で捕まえる。このときの容器の電位を測定し、あらかじめ容器の静電容量を設定しておくことにより $Q = CV$ の関係から水滴の電荷を求める。ただし、このとき水氷滴以外の

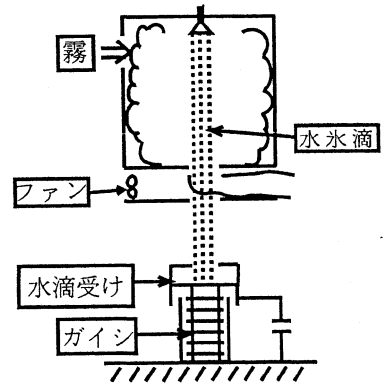


図1 実験装置

の帯電した霧が測定容器に触れると水滴の電荷のみの測定が困難になるので、箱の下の中央に穴の空いた遮へい板を置きその上にファンをのせて霧だけを吹き飛ばし水滴受けに霧がかからないようにした。

また、実験における霧の濃度測定の方法として、霧を入れる箱の側面からビーム状の光を入れ、この光の照度を反対の側面から測定する。この照度は霧の濃度と比例していると考えられるので、霧の濃度基準として用いた。

以上のような装置で、ノズルの位置や霧の持つ電荷量などを変化させることにより水及び氷滴の帯電に関する相互作用実験を行った。

この実験では霧発生装置としてスプレーイングシステム社のMinifogger MF-1を使用した。これは、水を供給するタンクと圧縮空気を発生させるコンプレッサをMinifoggerに接続し、水を圧縮空気で粉碎する装置で空気圧と霧を噴射するノズルを変えることにより種類の直径の霧状の粒子を発生することができる。この装置抗生からタンクとコンプレッサ接続するホースに対縁物を使用し、タンクとをMinifidgger地上から絶縁することにより霧発生部ノベルへの高是電圧の印加が可能になる。Minifoggerの規格書より霧粒子径 ϕ [m] と霧粒子の噴射量 v [m^3/s] の関係が分かっている。

2.2 霧粒子密度の測定

霧を入れる箱内での照度と単位体積中の霧粒子数（以後、粒粒子数密度と呼ぶ）との関係を調べるために図2のような装置を考えた。

図2のように出入り口以外を密封しあらかじめ単位時間当たりの吸引量 Bv [m^3/s] が分かっている吸引機（今回は掃除機）を用いる。またフィルターとして霧粒子を通さず付着する布状のフィルターを吸引機の吸引側に装着する。このフィルターの重さはあらかじめ量しておく。

次に、実験で使用する箱の中に霧粒子径 ϕ の霧を噴射する。すると箱の中の照度は現象していく。初期照度 x_0 [$1x$] の値で霧の噴射を停止し同時にフィルターを装着した吸引機を箱の中に挿入し t 秒間霧を吸引しその後、フィルターの重さの増加量 m [g] を計測する。

水の比重を1と考えるとこの重さの増加量がそのまま体積

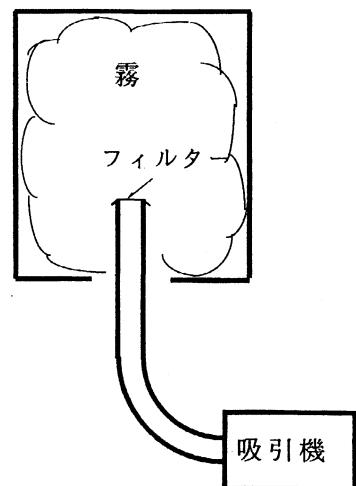


図2 霧粒子数密度計測のための実験装置

の増加 V_c [m^3] となる。ここでMinifoggerの粒子径 ϕ と噴射量 v の値が規格書よりわかっているので増加分の霧粒子の数が次のように計算できる。

$$\frac{V_c}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^3} \quad (1)$$

よって単位体積中の霧粒子数は以下のようになる。

$$Mr = \frac{V_c}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^3} Bvt \quad (2)$$

また照度を表す値として照度低下率 $X = x_1/x_0$ [%] を用いると霧粒子径 $\phi = 7.2$ [μm] の時の照度低下率 X [%] と霧粒子数密度 Mr [m^{-3}] の関係は図3. 2のようになる。同様に霧粒子径 $\phi = 14.1$ [μm] の場合を図3. 2に示す。

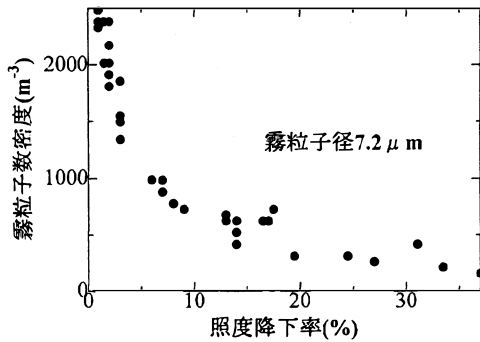


図3. 1

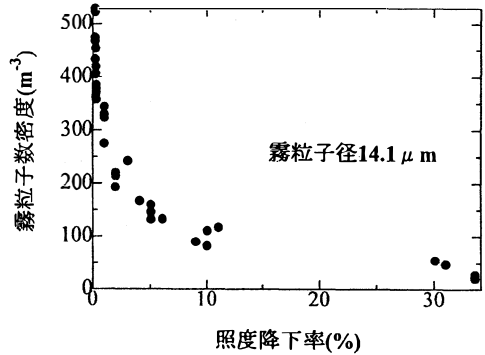


図3. 2

この関係から、霧粒子数密度を測定することができる。

2. 3 霧に電荷を持たせる方法

帯電した霧（以後帯電霧と呼ぶ）の発生方法を説明する。使用するMinifoggerの霧発生部に直接電圧（ $-25kv \sim +25kv$ ）を印加し、霧に電荷を持たせる方法を考案した。さらに、霧が持つ電荷量を知るため、直流電圧電源からMinifoggerに導入する電流 I_m [A] を測定する。1秒間に使用する水量を v [m/s]、霧の粒子径を ϕ [m] になるようにコンプレッサとノズルを設定すると、霧粒子一粒が持つ電荷量 Q_r [C] は、

$$Q_r = \frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{\phi}{2}\right)^3 I_m}{v} \quad (3)$$

となる。

以上の結果と2.2での照度降下と霧粒子数密度との関係から任意の照度での空間電荷密度が計算できる。ただし、帯電された粒粒子の電荷は装置内で消えることがないものとする。

3. シミュレーション実験と測定結果 帯電霧の上層部からの降水及び降水実験

3. 1 電氣的に中性な水滴及び氷滴を帯電霧中に落下させた場合

3. 1. 1 水滴の場合 霧の上部に設置された雨に見立てた水滴落下用のノズルを設置する。電氣的に中性な水滴を発生させるために水滴発生部を設置した円筒状にした金属板で遮蔽し、他の電氣的影響を受けないようにする。次に箱の内部に帯電させた霧を充滿させ霧の照度が飽和したときに100mlの水滴をノズルより落下させ（20s間）、その水滴の電荷を測定する。

これを霧粒子径 $\phi = 7.2 \mu\text{m}$, $14.1 \mu\text{m}$ の場合と2種類について実験した。この結果を霧空間電荷密度と落下した水滴電荷の関係として図5に示す。この図に示すように空間電荷密度と水滴1ml当たりの電荷は同じ極性を示し、霧粒子径 $7.2 \mu\text{m}$ では霧の空間電荷密度が約 $\pm 140 [\text{nC}/\text{m}^3]$ の時約 $\pm 54 [\text{pC}/\text{ml}]$ で最高値を示すことがわかった。同様に霧粒子径 $14.1 \mu\text{m}$ では霧の空間電荷密度が約 $\pm 70 [\text{pC}/\text{ml}]$ で最高値を示した。

3. 1. 2 氷滴の場合 水滴を雪に見立てた氷滴に変えて3. 1. 1と同じようにして実験を行った。氷滴は一般のかき氷器を用いた。

その結果、図6に示すように、氷滴は霧の電荷と同じ極性をしめた。霧粒子径 $7.2 \mu\text{m}$ では霧空間密度が約 $\pm 200 \text{nC}/\text{m}^3$ の時に落下水滴の電荷密度は約 $\pm 90 \text{pC}/\text{ml}$ で最高値を示した。霧粒子径 $14.1 \mu\text{m}$ の場合でも氷滴は霧の電荷と同じ極性を示した。

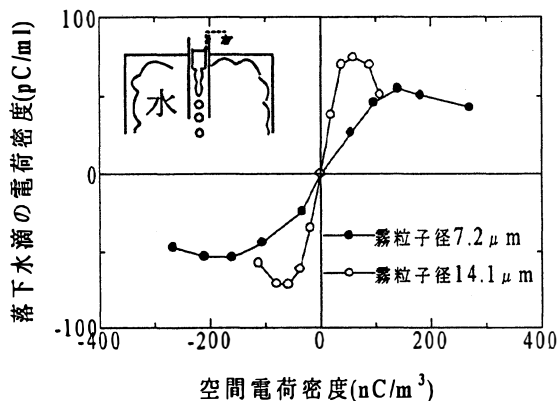


図5

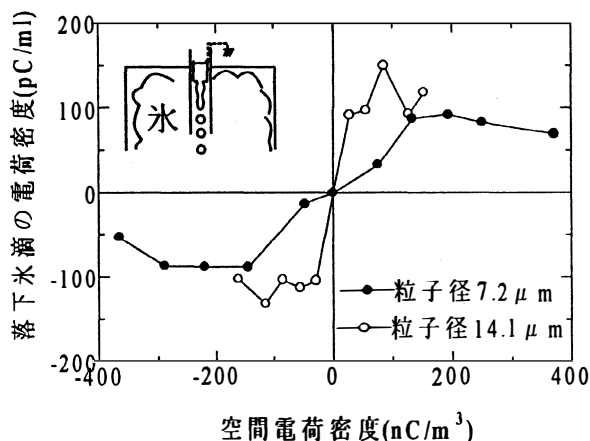


図6

3. 1. 3 水滴と氷滴を比較した

場合 3.1.1, 3.1.2

の結果より霧粒子径 $7.2\mu\text{m}$ の時、水滴と氷滴と比べると図7に示すようになる。この図より水滴と氷滴とはほぼ同じ電荷密度特性を持つが、水滴より氷滴の方が約2倍の高い電荷を持つことが分かった。

3. 2 帯電霧上部より水滴及び氷滴を落下させた場合

3. 2. 1 水滴の場合 霧の上部に

接地された雨に見立てた水滴落下用のノズルを設置する。今度は水滴発生部に帯電霧からの静電誘導の影響を受けるよう遮蔽は行わない。そして他の条件は、3.1.1と同じようにして実験を行った。その結果、落下水滴電荷は図8に示すように霧の電荷と逆の極性を示し、霧粒子径 $7.2\mu\text{m}$ の場合落下水滴の電荷密度は約 $\pm 11\text{nC/ml}$ で飽和することが分かった。また霧粒子径 $14.1\mu\text{m}$ の場合落下水滴の電荷物密度は約 $\pm 9\text{nC/ml}$ で飽和することが分かった。

3. 2. 2 氷滴の場合 水滴を氷滴に変えて3. 2. 1と同じようにして実験を行った。

その結果図9に示すように水滴の場合と同じく帯電霧の逆極性の特性を示した。ここでは霧粒子径 $7.2\mu\text{m}$ の場合のみを示す。

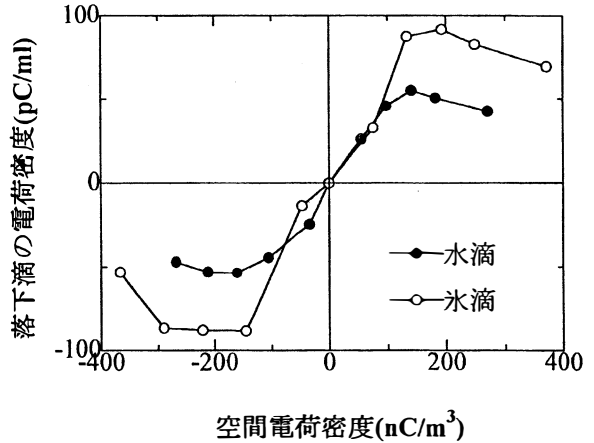


図7

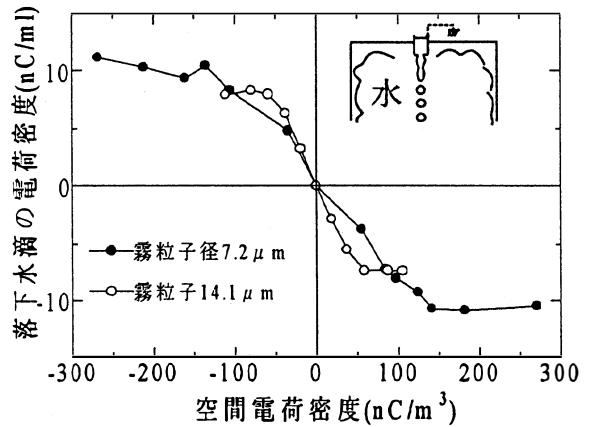


図8

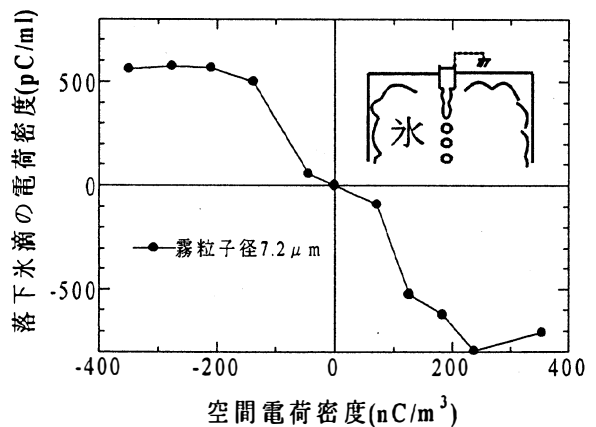


図9

3. 2. 3 水滴と氷滴の関係

3. 2. 1, 3. 2. 2の結果より霧粒子径 $7.2\mu\text{m}$ 時の水滴と氷滴を比べると図10のようになる。この図から氷滴より水滴の方が約20倍もの高い電荷を持つことが分かった。

5. 考 察

5. 1 水滴及び氷滴が中性で落下する場合

3. 1の場合では図11(a)のように、ノズルを周りから遮蔽することにより周りからの静電誘導は受けない。そのためノズルを接地しておけば水滴及び氷滴は帯電しない状態で発生する。そして落下した水滴及び氷滴が霧内を通過することによってのみ帯電する。これは水や氷滴が霧粒子と衝突結合し、この電荷を吸収するために帯電すると考えられる。

図5で示した落下水滴の電荷密度がピーク値を持つ理由は、空間電荷密度を上げることによって、落下水滴の帯電量がある程度まで大きくなると、霧は水滴と同極であるために反撥しそれ以上帯電しないことと考えられる。図6も同様の理由でピーク値が現れると思われるが氷滴は同形なものを発生させることが難しく、いびつな形になったと思われる。

また図5と図6から霧粒子径が大きい方が帯電量が多くなるのは、霧粒子が小さい方が落下してくる水や氷滴に反撥されやすく付着帯電しにくいからだと考えられる。

3. 1. 3の結果図7より雪の場合の帯電量が多いことが見られる。これは氷滴の方が水滴に比べ表面積が大きく霧に付着し帯電しやすいためである。

5. 2 静電誘導を受けて落下する場合

3. 2の場合は図11(b)のように、ノズルが周りからの静電誘導を受けるために、落下しようとする水や氷滴には霧とは逆極性の電荷が誘起され、霧と同極性の霧は遠い場所へ（この場合はアース線を通り地面へ）移動する。その状態で水や氷滴になるために水や氷滴は霧と逆の電荷を持つことになる。

3. 2. 1の結果図8からは粒子径の違いによる変化はあまり見られない。これは上述の帯電過程から考えると、水滴は発生時に帯電霧の誘導を受けるのであるから霧粒子径による変化はないからである。3. 2の実験は水や氷滴は発生時に霧と逆性に帯電されるがこの水や氷滴が霧の中を通過する

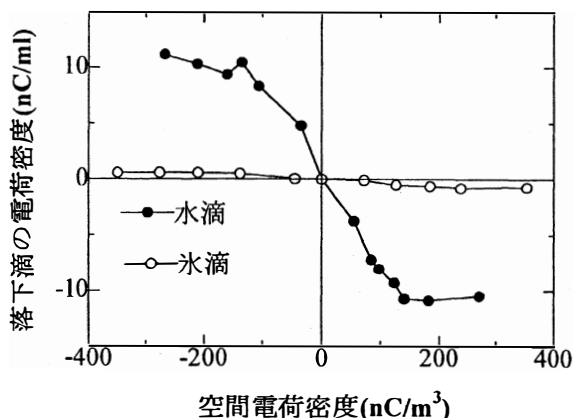


図10

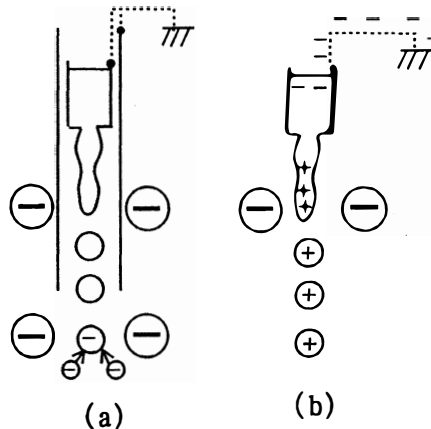


図11

ことで霧の電荷を付着するので結果はの総和としてでてくるものと思われる。

また、3. 2. 3の図10より水滴の方が氷滴よりも帯電量が多い理由として水滴は水を削って発生させており、水の中での電荷の移動が水に比べ悪く、しかも単位重さ当たりの体積が水滴に比べ大きいいため誘導帯電がしにくと考えられる。

6. 結 び

この水や水滴が発生する時点で誘導による帯電と、霧の中を通過することによる付着による帯電のそれぞれの大きさは、水滴の場合図5と図8を比較することにより、静電誘導を受けて帯電した電荷量の方が、霧との衝突統合により帯電した電荷量よりも約二桁大きいことがわかる。これは、水滴を帯電させるときの現象の違いによると考えられる。霧との衝突統合による水滴の帯電は、帯電した霧粒子が水滴に衝突結合によりのみ帯電する。また、水滴が帯電すると霧と水滴は同極性になるため電氣的に反発し、さらに霧の質量が小さいために水滴の帯電量が小さい値でも反発する。それに比べ、静電誘導による帯電は水滴になる前に電荷が集まっておりこれが分離して水滴となるため、このときの電離は非常に有効に働く。これが図5と図8の帯電量の違いであると考えられる。また水滴の場合では図6と図9を同様に比較をすると静電誘導を受け帯電した電荷量の方が、霧との衝突結合により帯電した電荷量よりも約二倍大きいことがわかる。この理由も水滴の場合と同じであるが、水滴の場合の方が格差は小さい。これは水滴発生過程に原因があると思われる。水滴は水滴に比べて発生時に荒く削られるために単位重さ当たりの体積が大きくよって表面積が広くなり誘導帯電がしにくと考えられる。逆にそのために氷滴は水滴に比べて付着帯電しやすいと言える。

以上述べたような相違が現れた原因は、水や水滴が発生する過程での静電誘導帯電、水水滴が霧内を通過することによる水や水滴の付着帯電に起因していると考えられる。

この実験は上空の帯電した雲を想定したシミュレーションであるが実際の空間電荷密度よりもはるかに大きな電荷密度で行ったため雷雲のシミュレーションと状況が異なっている。しかし今回の実験から霧の下部から電荷を持った水や水滴が落下する場合、電荷を持った霧からの誘導による帯電と、電荷を持った雲を吸収することによる帯電とが存在することがわかった。さらには、空間電荷密度と水滴、氷滴の帯電の関係が数値的にも求められた。また同種の霧内でも水滴と氷滴とでは帯電量の違いが見られるということも分かった。これらの実験結果は今後の雷雲の電氣的構造解明に役立つものとなるであろう。

今回はシミュレーション実験の方法でこれまでは一つの極性に帯電した雲を想定していたのであるが、今後は二つ以上の帯電した雲を想定するなど様々な状況を想定した実験を行っていくことで、空間電荷密度と落下帯電物の様々な関係を求めていこうと考えている。これらの結果から、実際の地上で観測した雨滴の帯電情報から、上空の雲の電氣的状況を推測できる。可能性があるのではないかと考えている。

参 照

- 1) G. Byrne J, of geophys, reseach, Vol, 94, No. D5, 6297-6307, 1989
“Electric Field Measurements Within a Severe Thunderstorm Anvil.”