

電荷霧と水滴の電氣的相互作用

—雷雲の電氣的構造シミュレーション実験—

富井 淳敏, 北村 岩雄, 池田 長康

§ 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要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（以後電荷降水と呼ぶ）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. 可能な雨滴発生状況

雷雲内から帯電した雨滴が発生する状況として、図1のような2つの状況が考えられる。図1(a)は雨滴が帯電した雲の上部から発生し、帯電した雲を通過して落下してくる場合であり、同図(b)は帯電した雲の内部より雨滴が、発生した場合である。

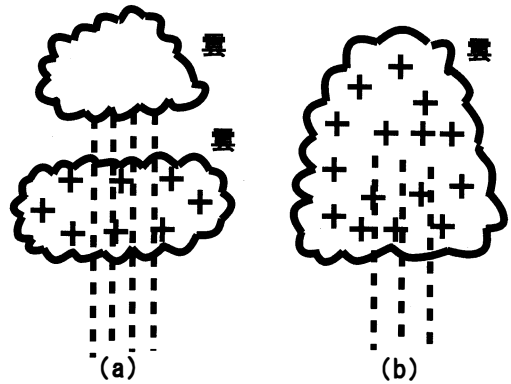


図1 雨滴発生環境の仮定

§ 3 実験装置

3.1 実験装置

§ 2で仮定した状況をシミュレーションするために、図2の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 $1 \times 1.1\text{m}$ 、高さが $1.5 \sim 3.0\text{m}$ に変化可能な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を落下させる。この水滴は霧の内部から箱の下部に空いた穴を通過し、箱の下の碍子の上の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決定しておくこ

とにより $Q=CV$ の関係から水滴の電荷を求める。ただし、このとき水滴以外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仮定した雨滴の帯電に関するシミュレーション実験を行った。

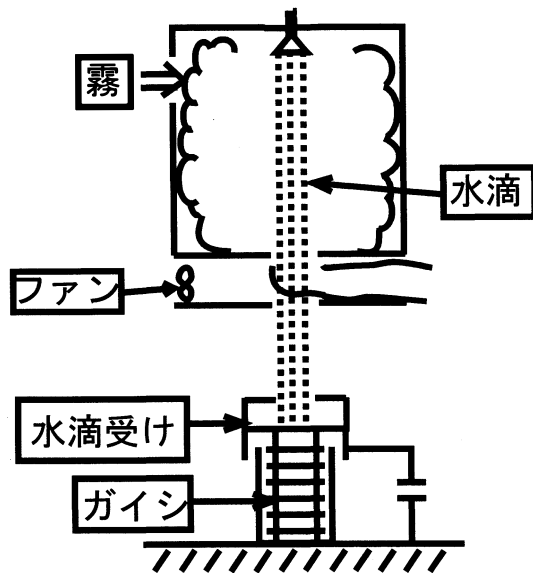


図2 実験装置

3.2 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。まず、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、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直径 $7.2 \sim 18.9 \mu\text{m}$ の霧状の粒子を発生することができる。この装置構成からタンクとコンプレッサを接続するホースに絶縁物を使用し、タンクと Minifogger を地上から絶縁することにより霧発生部ノズルへの高電圧の印加が可能になる。

以上のことから、霧発生部に直接電圧を印加し、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 に流入する電流を測定した。1秒間に使用する水量は $6.94 \times 10^{-7} \text{m}^3/\text{sec}$ であり霧の粒径は $7.2 \mu\text{m}$ になるようにコンプレッサとノズルを設定したので、1秒間に 3.56×10^9 個の霧粒子が発生すると計算できる。よって、この電流値から霧粒子一粒が

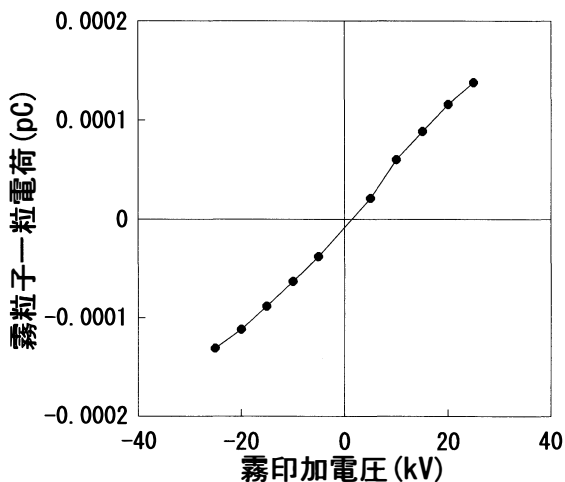


図3

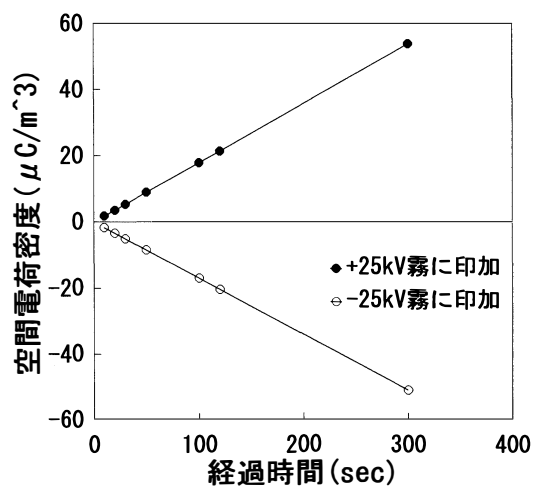


図4

持つ電荷の量は計算できる。その結果は図3に示すように、霧一粒子当たりの電荷量は約±0.0001 pC以下であり印加電圧の上昇にはほぼ比例して増加する。

以上の結果を使用し、実験装置内の時間経過による霧の空間電荷密度変化を計算したものを図4に示す。ただし、霧への印加電圧は±25kVで、霧が装置内で消えることなく、且つ常に供給され続けるものとする。この空間電荷密度は実際測定された雷雲の空間電荷密度が 10^{-6}C/m^3 のオーダーである¹⁾ことと比較すると、非常に濃い状態であることがわかる。

実験結果を示すときの空間電荷密度は、水滴を落とし始める時間が霧を入れ始めてからおよそ120 sec後であるので、120secでの空間電荷密度の計算値を使用した。

§ 4 シミュレーション実験と測定結果

4.1 帯電霧の上層外部からの降水実験

i) 水滴発生部を遮へいしない場合の実験

霧の上部に接地された水滴落下用のノズルを設置する。箱の内部には帯電させた霧を充満する。そして、霧の濃度基準となる照度が約30lxになったときに500ccの水滴をノズルより2.5m霧の中を落下させ、その水滴の電荷を測定する。

その結果、図5に示すように空間電荷密度と水滴1cc当たりの電荷は逆の極性を示し、また水滴の電荷は空間電荷密度が約 $\pm 15 \times 10^{-6} [\text{C/m}^3]$ 以上になると飽和することがわかった。

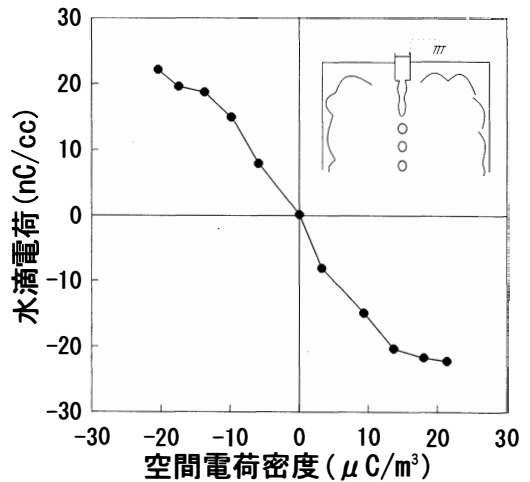


図5

ii) 水滴発生部を遮へいした場合の実験

ノズルから落下する水滴への周りの電荷を持った霧からの影響をなくすために接地した円筒状の筒で囲い遮へいした。そして、4.1 i)と同じようにして実験を行う。

その結果、図6に示すように、水滴は霧の電荷と同じ極性を示し、空間電荷密度が約 $\pm 20 \times 10^{-6}$ 以上になると飽和することもわかった。

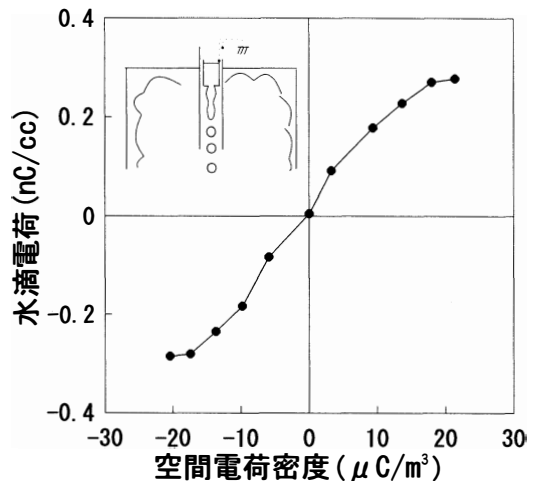


図6

4.2 帯電霧内部からの降雨実験

i) 水滴の電荷のみ測定

霧の内部にノズルと水を入れたタンク全体を絶縁した状態で設置する。このようにすることによりタンク、ノズルは霧内部に浮いた状態となる。そして、4.1 i)と同じようにして実験を行う。但し、この実験では水滴の霧中通過距離は1.5mである。その結果、図7に示すように霧の電荷と同じ極性を示し、その値は空間電荷密度にほぼ比例することがわかった。

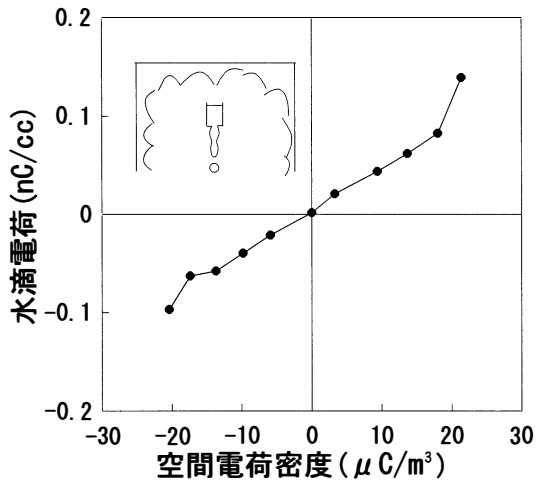


図7

ii) 水滴とノズルの電荷を測定

ノズルは4.2 i)と同じ状態にして実験を行い水滴の電荷と共にノズルの電荷変化も測定した。

その結果、図8に示すように水滴1cc当たりの電荷量の大きさ、空間電荷密度との関係はともに4.1 i)の結果とほぼ同じであった。また、ノズルの電荷は水滴の電荷に比べ極性が正負逆の値となった。これはタンクの電荷量測定のため、測定線が箱外に引出され、1 μF のコンデンサーに接続されたためと考えられる。

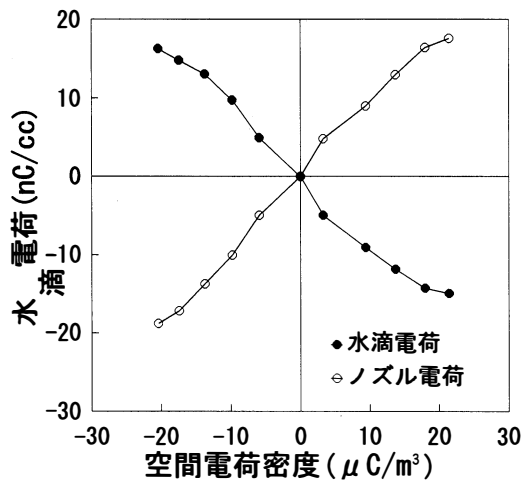


図8

4.3 水滴の通過距離を変化させた場合

箱の底面を上下に移動し高さを変化させ水滴が霧の中を通過する距離を変化させた。このときのノズル等の設置状態は4.1 ii)と同じものを使用した。そして、4.1 i)と同じ様にして実験を行った。

その結果、図9に示すように、水滴電荷は通過距離が約2m以上になると飽和することがわかった。

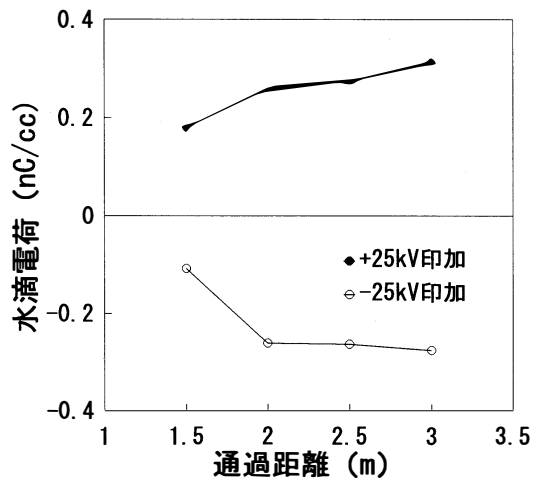


図9

§ 5 実験結果についての考察

以上のような結果が現れた原因は、水滴が発生する過程での静電誘導帯電、水滴が霧内を通過することによる水滴と霧の結合帯電に起因していると考えられる。

水滴が発生する過程での帯電は次の三つの場合が考えられる。まず第一は4.1 i) の場合で図10(a)のように、ノズルが周りからの誘導を受けるために、落下しようとする水滴には霧とは逆極性の電荷が誘導され、霧と同極性の電荷は霧から遠い場所へ（この場合はアース線を通り地面へ）移動する。その状態で水滴になるために水滴は霧と逆の電荷を持つ。第二は4.1 ii) の場合で図10(b)のように、ノズルを周りから遮へいすることにより周りからの誘導はない。そのため水滴はノズルを接地しておけば帯電しない状態で発生する。第三は4.2 i) の場合で図10(c)のように、水のタンクとノズル全体が霧の中に絶縁され、浮いた状態になっている。そのため、周りの霧からノズルとタンク全体は静電誘導を受けるが、タンク内電荷は中性を維持しようとして、大きな電氣的力が働くため、水滴発生部が帯電することはできない。よって、タンクに付着した霧からの帯電がわずかに存在するが、水滴はほとんど電荷を持たない状態で発生し、落下の最中に霧との衝突結合により帯電をおこなう。4.2 ii) の場合であるが、タンクの電荷を測定するために線が箱外に引き出されており、さらにその静電容量も $1 \mu\text{F}$ と非常に大きなコンデンサーに接続していたため、ほとんど接地されていたのと同じ効果があったと考えられる。以上の理由により、現象としては4.1 i) と同じことが起こっていたと考えられるので、水滴電荷は4.1 i) と同じ結果が現れたと考えられる。

また水滴が霧内を通過することによる帯電は、水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いうことが考えられる。

この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帯電のそれぞれの大きさは、4.1 i) と4.1 ii) を比較することにより、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。霧との衝突結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と同時に生じ、このときの電離は上記の値に比べて非常に有効に働く。以上の理由から4.1 i)、4.1 ii) の帯電量の違いがでたと考えられる。

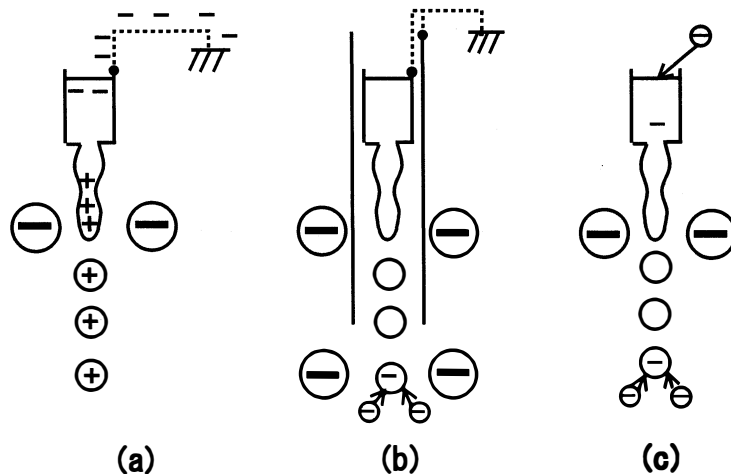


図10

§ 6 降雨時の雨滴の帯電状況の推測

以上の結果から、雨滴の発生状況は次の図11(a)~(d)のような場合が考えられる。(a)の場合は実験4.1 i)の状態では雨滴が発生する場合であり、電荷を持った雲が存在し、その上部より雨滴が発生した場合である。このとき、上部の雲は下の雲からの静電誘導を受けるために底面には下部とは逆極性の電荷を持つ、そして誘導を受けたまま雨滴は発生するために、雨滴は下部の雲とは逆極性の電荷を持って落下する。この雨滴は途中逆の電荷を持った雲内を通過するが、そこで吸収する電荷ははじめから持っている電荷よりも遥かに小さいために地上に落下する時点での雨滴電荷ははじめに持った電荷と同じ極性のままである。そして、雨滴が発生した雲は雨滴とは逆極性の電荷量が増加するものと推測される。(b)の場合は実験4.2 i)の状態では雨滴が発生する、つまり電荷を持った雲内より雨滴が発生する場合である。このときは雨滴は電荷を持たない状態で発生し、途中雲の電荷を吸収しながら地上に落下する。そのために地上に落下する時点での雨滴電荷の極性は雲と同じ極性である。図(c)、(d)は、電荷を持った雲の上部から雨滴が発生するが、図(c)は下の雲の電荷からの誘導を遮へいする何らかの遮へい層のようなものが存在する。そのために周りからの誘導を受けずに雨滴が発生する場合、図(d)は下層の雲の誘導を受けないほどの高さから雨滴が発生するために、下部の雲からの誘導がほとんど無い状態で雨滴が発生する場合である。つまり図(c)、(d)は実験4.1 ii)の状態である。そのため雨滴は電荷を持たない状態で発生する。そして、雨滴は途中電荷を持った雲内を通過する際に雲の電荷を吸収し、地上に落下してくるので、地上に落下する時点での雨滴電荷の極性は下に存在する雲と同じ極性となる。

雲の電気構造として以上四つの場合が地上に落下してきたときの帯電した雨滴の発生状況として考えられる。

実際の雨滴の帯電発生状況が今回実験を行った4.1 i)、4.2 ii)、4.1 ii)の場合のどの状況に近いかわ、雷雲内における空間電荷密度と雷雲内から落下した雨滴1 cc当たりの帯電電荷量の関係実験データを使用し比較を行った。

比較の方法は、まず実験値の空間電荷密度が小さい領域ではその密度と水滴電荷はほぼ比例してい

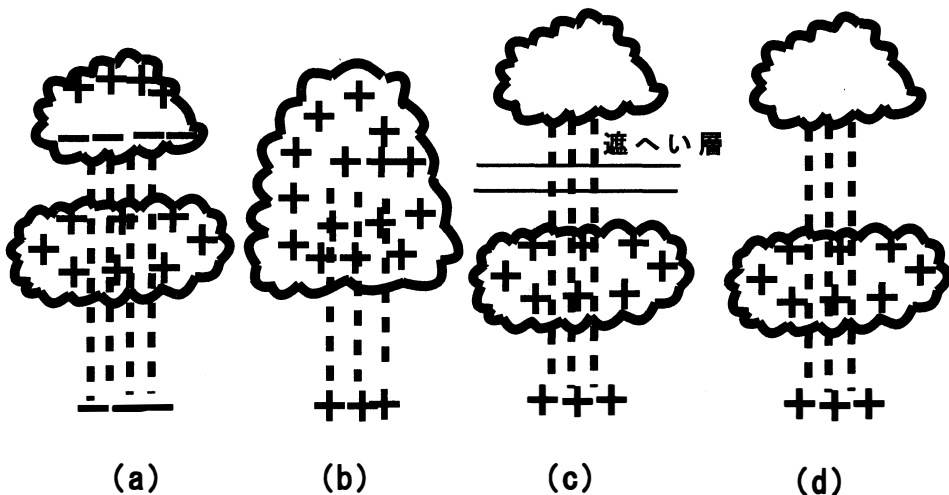


図11

ということから空間電荷密度と水滴電荷の比例定数を求める。この関係から、実際の雨滴1cc当たりの帯電電荷量測定値から予測される上空の雲の空間電荷密度を求める。ただし、4.1 i), 4.1 ii) では空間電荷密度が約 $\pm 15 \times 10^{-6}$ 以上で飽和しているので、空間電荷密度がこれ以上大きくなる場合には適用できない。この求められた空間電荷密度が実際に測定された雷雲内の空間電荷密度により近いシミュレーションのものが、実際の雨滴の発生過程における帯電原因なのではないかと考えられる。

実際の雷雲内で測定された空間電荷密度は文献1)によると $1 \times 10^{-9} [\text{C}/\text{m}^3]$ である。また、著者らの実際の降雨電荷量測定によると、雨滴1cc当たりの帯電電荷量は $7.24 \times 10^{-10} [\text{C}/\text{cc}]$ であった。これらの値は違う時間や場所において観測された結果であるために、厳密に比較対照することはできないが、一つの目安にできると考えられる。これらの比較結果を表1に示す。

	雨滴電荷(C/cc)	比例定数	空間電荷密度(C/m ³)
実際の観測値	7.24E-10		1.00E-09
実験4.1 i)	"	-1.59E-03	-4.55E-07
実験4.2 i)	"	4.76E-06	1.52E-04
実験4.1 ii)	"	1.91E-05	3.79E-05

表1

以上の結果、どの実験においても実際の値よりも大きい値が出た。しかし、実際の箱内の霧は下部の穴からの流出や壁への付着などが存在するので、実験解析で使用した霧の空間電荷密度よりも小さい値となっている。そのため、比例定数はさらに大きくなることが考えられるので、上部で計算した空間電荷密度より小さくなることが考えられる。よって、今回の三つの実験の状況での雨滴発生は、実験における空間電荷密度次第でそれぞれの可能性は存在するが、その中でも桁的に実験4.1 i) が可能性としては最も高いので、実際の雨滴は図11(a)のような、すなわち降雨が雷雲の上部などから周りの電荷の誘導を受けて発生したのではないかと推察できる。

§ 7 結 び

実際地上で観測される降雨の電荷は、正極性が現れたから上空に正極性の雲が存在するということが断言できない。しかし、今回の実験から水滴が電荷を持った雲の上空から発生する際あるいは電荷を持った雲内を通過する際、電荷を持った雲からの誘導による帯電、電荷を持った雲を吸収することによる帯電が存在することがわかった。さらには、空間電荷密度と雨滴の帯電の関係が数値的にも求められた。

この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、あるいは、水滴の代わりに氷を使用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。その結果、実際の地上で観測した雨滴の帯電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."

Electric Interaction between charged fog and water drops

— simulation experiments for the electric structure in a thundercloud —

Atutoshi Tomii, Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda

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

[英文和訳]

電荷霧と水滴の電氣的相互作用

— 雷雲の電氣的構造シミュレーション実験 —

富井 淳敏, 北村 岩雄, 池田 長康

雷雲の電氣的構造の室内におけるシミュレーションとして帯電霧と水滴の電氣的相互作用を調べる実験を行った。電荷した雲の代わりに電荷させた霧をこのシミュレーションでは使用した。この実験では様々な状態に帯電した霧の中に水滴を通過させ、その水滴の帯電を測定した。その結果、水滴は分裂する瞬間の状況により様々な極性と値に帯電することがわかった。