

雷雲の電氣的構造シミュレーション実験

—帯電霧と水滴の電氣的相互作用，二重層帯電霧における電界変化—

松田 正樹，七野 公介，北村 岩雄，池田 長康
酒井 勉，若井 武夫*（北陸電力地域総合研究所）

Simulation experiments of the electric structure in a thundercloud
— Electric interaction between charged fog and water drops
and Electric field change by double charged fog —

Masaki Matsuda, Kimisuke Hichino, Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda,
Tsutomu Sakai*, Takeo Wakai* * Hokuriku Electric Power Co

Experiments on electric interaction between charged fog and water drops as the indoor simulation for the electric structure in a thundercloud are carried. The charged fog instead of the charged cloud is used in this experiment. The electrifications of water drops passing 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 under various situations which depended on the separation conditions of water and ice drops at its moment. Measurements of electric field on the ground on various charged fogs are also carried out. It is found from this experiment that neutral fog coming into under the charged layer is separated electrically by electrostatic induction and the fog act like lowering the charge layer.

キーワード：雷，雲，雷雲，落雷，電界

§ 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，何処で発生するかわからないということから，これらに関する情報は極めて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明しようと考えている。雷雲から発生する降雨，降雪にはプラスやマイナスの電荷が含まれていることが観測されている。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，未だ不明な点が多く主だった原因は明らかにされていない。そこで我々はこの帯電過程の原因を模索する中で，雲中の電荷量に注目

した。室内で単純な電氣的構造を持った雷雲模型を作り、その中で人工的に雨滴を発生させ、その帯電過程を調べる実験を行った。また、電荷量の異なる2つの帯電雲が地上の電界強度に与える影響を調べる実験も行い、解析を試みた。

§ 2 帯電霧と水滴の電氣的相互作用シミュレーション実験

2.1 実験装置と実験方法

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1×1m、高さが2.6mのビニールシートで覆われた箱の中に帯電した霧を充満させる。霧の帯電方法は霧発生装置を絶縁して設置し、金属製噴霧ノズルに直流高電圧を印加する事によって霧を帯電させた。また電流計の値からこの霧の帯電量を計測する事が可能である。実験はこの帯電方法で発生させた霧を3分間噴射し、箱内を充満させた状態にする。その後高電圧発生装置と霧の発生を停止し同時に蒸留水500mlの入った金属製容器（以後この容器をノズルと称する）を霧の内部に挿入する。この容器から蒸留水を落下させることによって、雲中から発生した雨滴を相似させる。ノズルから落下する水滴は完全に落ち切るまでに約4分かかる。このノズルは外部から絶縁されており、浮遊のキャパシタンス22pFをもつ。またノズルは数千ボルトの高電圧になることが予想され、この高電位を計測するためにコンデンサの分圧法を用いた。ノズルから落下する水滴は霧の内部から箱の下部にあいた穴を通過して箱の下に設けられた導電性容器（以後たらいと称する）で捕まえる。このたらいは碍子で絶縁されており、これも大地に対してのキャパシタンスとして考えられ（117pF）、これに既知容量のコンデンサ（9.92nF）を結線し、たらいの電位を測定可能にした（合計10nF）。また、たらいに帯電した霧が付着し、影響されないように箱の下にもうけたファンで霧を吹き飛ばした。これらの実験方法で印加電圧を-25kVから+25kVまで5kVづつ電圧を変え、11ポイント選択し実験を行った。

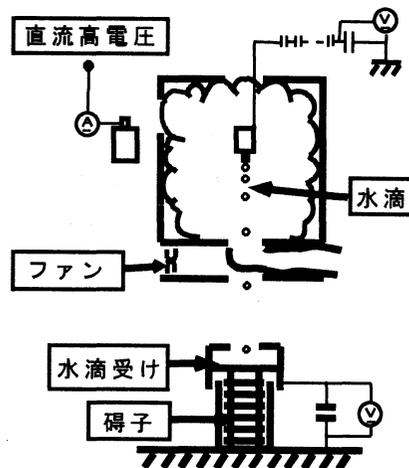


図1 実験装置

2.2 実験結果

2.2.1 実験結果の一例（正電荷の霧の場合）

実験結果の一例を図2に示す。図2は高電圧発生装置に+25kV印加して正電荷を持った霧を発生させた時のノズルとたらいの時間的電位変化を示したものである。上図にノズル、下図にたらいの時間的電位変化を示す。横軸は霧を発生させてからの共通の時間(s)を示し、縦軸はそれぞれの電位(V)である。

霧を噴射後180sで霧の供給と高電圧装置を切りノズルを挿入する（図2①の始点）。するとノズル電位は急激に上昇し、挿入後4.5sに7281.05Vのピークを迎えた後、降下した。この時点ではまだノズルから水滴が落下していないため落下水滴を捕獲するたらい電位の変化はなかった。次にノズルを挿入してから5秒後にノズルから水滴を落下させた（図2の①と②の境界線）。ノズル電位は一旦上昇し、水滴落下後5.75sにピーク電圧7216.52Vを迎えた後降下した。一方たらい電位は降下した後上昇

するという逆特性を示した（ピーク値:水滴落下後11.25s, -7.215V）。またそれぞれのピーク値では、ノズル電位の方が早く現われる結果を示した。

2.2.2 ノズル, たらい電位の時間的電位変化についての解析

前節で述べたノズルとたらいの二つの電位変化について、その現象を考察する。図2の①はノズルを挿入してから水滴を落下させるまでの領域である。領域①ではノズルを挿入すると帯電した霧が付着し、ノズルの浮遊キャパシタンスを充電し、電位は急激に上昇する。しかし、ノズルには漏れ抵抗 ($1.68 \times 10^{12} \Omega$) が存在し、漏れ電流が発生する。よってノズル電位は放電特性の形でしだいに降下すると考えられる。②は、水滴落下時から、たらい電位が下降状態の領域とする。ここで重要なことはノズルから水滴を落下させることによって、ノズル電位が周囲の霧と等電位になろうとする性質を持つことである。②の領域ではノズル電位は実際の霧電位に比べて低いために、負電荷の水滴を落下させることにより、ノズル電位を上昇させようとする。そのため、たらいの電位は降下する。しかしノズル電位が上昇するに伴い漏れ電流が増加し、実際の霧電位に至る前に降下をはじめると思われる。従って②のノズルのピーク値は漏れる正電荷量と落下水滴の負電荷量が一致する点と考えられる。また、たらいが中性の水滴を受け取る時、すなわちたらい電位が下降から上昇に転ずる時（図2の②と③の境界）が霧の電位と、ノズルの電位が等しくなるところと考えられる。③の領域では、ノズル電位が降下し、たらいの電位は上昇している。これは周囲の霧が晴れ、霧電位そのものが急激に低下し、それに追従しようとするノズル電位も同じく低下しようとしていると考えられる。この時ノズルの電位を低下させるのに、漏れ電流による正電荷の放出だけでは間に合わず、正電荷の水滴を落下させ、ノズル電位を降下させているものと考えられる。

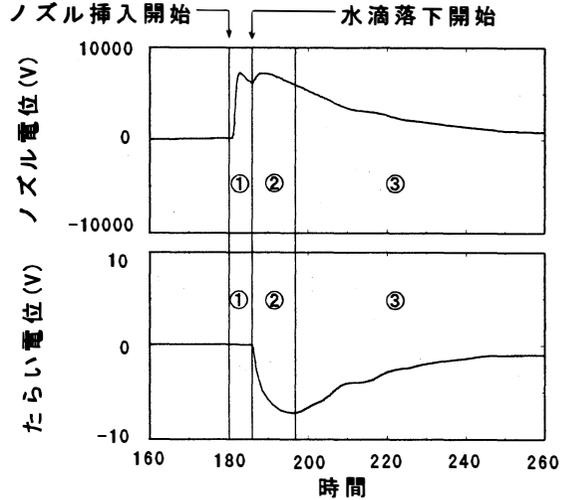


図2 実験結果の一例

2.2.3 実験結果（正負電荷を持った霧の場合）

図3と図4に霧発生装置に-25kVから+25kVまで5kVごとに印加したときのそれぞれの波形結果を示す。図3はノズル電位、図4はたらい電位の時間的電位変化である。図3のようにノズル電位は

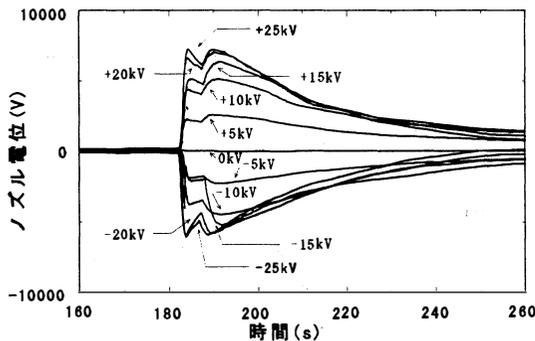


図3 ノズル電位の全データ

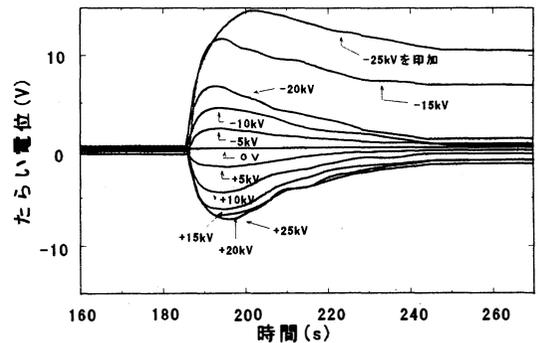


図4 たらい電位の全データ

霧の電位に近づこうとするため、霧と同極性特性を示す。電圧を上昇させるに伴いノズルの電位は上昇しているが±15kV以上では上昇の度合いが小さくなり飽和している。図4では、たらいの電位はノズル電位とは逆極性に変化し、ほぼ、印加電圧とともにその値が上昇している。しかし、ノズル電位の波形に比べらつきがある。それは、箱内の帯電霧が激しく対流しているために電荷密度の濃さの違いによる影響が見られるものと思われる。

§ 3 仮想二重層帯電霧の電界強度測定実験

3.1 二重帯電霧の電界測定実験装置

二重層帯電霧における電界強度の変化を調べるために、図5に示す装置によって実験を行った。ここで二重層の帯電霧とは上下異なる極性を持った霧のことをいう。位置が一定であれば、電界は雲の帯電量によって変化する。図5に示すように底面1m×1m、縦1.3mのビニールシートで覆った箱を用意する。上部の帯電霧を仮想するために箱の上部に絶縁された木板を設置し、直流高電圧を印加する。また、下部の帯電雲の模型として箱の中に帯電した霧を充填させる。霧の帯電方法は2.1節で述べたのと同じ方法で行う。箱の下部は直径20cmの穴の空いた木板によって仕切られている。その穴の直下に電界測定装置を設置し、箱上部の木板と霧からの電界を測定可能にした。電界測定装置から上部木板と箱の下部までの距離はそれぞれ145cm、15cmである。また、電界測定装置に帯電霧が付着しないようにエアカーテンを箱下部に設置した。

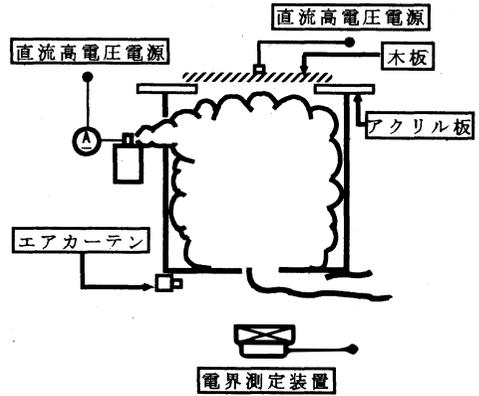


図5 仮想二重層の実験装置

3.2 電界測定実験結果

3.2.1 木板からの電界測定結果

まず上層部からの電界強度のみを測定するために、箱中には霧を噴射させず、箱上部木板に-25kVから+25kVまで5kVずつずらし直流高電圧を印加してそれぞれの電界強度を測定した。図6にその結果を示す。横軸は上部木板にかける電圧(kV)、縦軸は電界(V/cm)である。上部木板が0V時でも4.8V/cmの値を持つが、これは電界装置校正に限界があるためである。図6に示すように木板に印加する電圧を増加させると電界強度も増加し、+25kV印加した場合は電界は0V時に比べ約3.6V/cm増加し、-25kV印加した場合は約-4.8V/cm減少している。またその変化過程はほぼ比例状態にあることがいえる。電界測定装置と木板は145cm離れているために、理論上+25kV木板に印加した場合その電界強度の値は172.41V/cmであるが実際の実験での電界は非常に小さくなっている。これは電界測定装置上15cmのところ箱下部の板が設置されており、その板がアースされているために実際の電界強度は理論上よりも低くなると思われる。

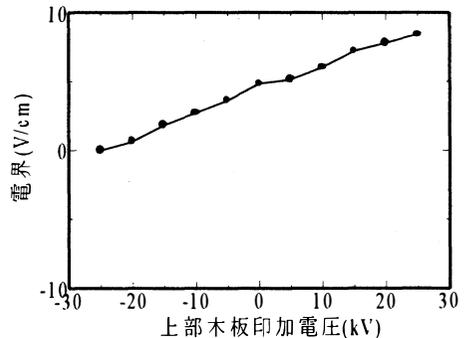


図6 上部木板のみに電圧を加えたときの電界

3.2.2 帯電霧からの電界測定結果

下層部からの電界強度を測定するために、木板には電圧をかけず、霧発生装置に-25kVから+25kVまで変化させて直流高電圧を印加して箱中に霧を充満させる。図7にそれぞれの電界強度の結果を示す。横軸は霧発生装置に印加する電圧(kV)、縦軸は電界(V/cm)である。図7に示すように霧に印加する電圧を増加させると電界強度も増加し、+25kV印加した場合には約104.29V/cmの電界が増加している。またその関係はほぼ比例関係にあるといえる。またこの節、霧に+25kV印加させた場合の電界は、前節の木板のみに+25kV印加させた場合の電界よりも約30倍も大きい事が分かった。電界測定装置から箱下部までの距離は15cmであるので、箱下部の霧電位は1564.28Vであると考えることができる。

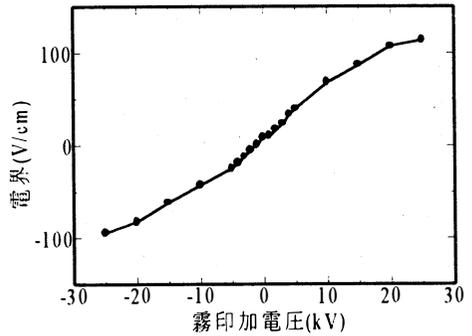


図7 霧のみに電圧をかけた場合

3.2.3 帯電霧二重層による電界変化測定結果

二重層の帯電霧の電界強度変化を調べるために、まず箱内に電氣的中性の霧を充満させ、その後上部木板に高電圧を加えた時の電界時間的变化の様子を観察した。その実験結果が図8である。図8は実験開始後、電氣的中性の霧を120s間噴射し、その後上部木板に印加する電圧を25kV, 20kV, 15kV, 10kV, 5kV, 0Vと60s間づつ変化させたときの電界強度の時間的变化を表したものである。横軸は実験開始からの時間(s)であり、縦軸は電界(V/cm)である。図8から木板電圧を加えると電界が変化し約10sで安定することが分かる。また、木板印加電圧が減少するに伴い電界強度も低下している。電界は同条件中でも激しく変化しているが、これは箱内において霧が対流を起こし、電荷分布も同様、この対流影響と箱下部から不定期的に漏れる霧による影響だと思われる。今回、同条件下での電界強度を決定するために、一定条件後60sから115sまでの25s間の電界平均をその条件下での電界強度の値とした。

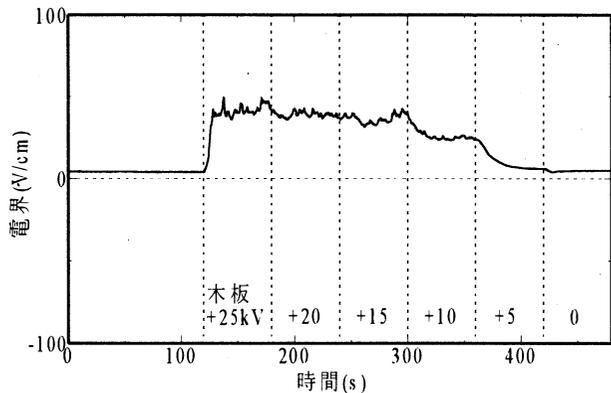


図8 上部木板の電位を変化させ多時の時間的電界変化(霧は中性)

図8から木板電圧を加えると電界が変化し約10sで安定することが分かる。また、木板印加電圧が減少するに伴い電界強度も低下している。電界は同条件中でも激しく変化しているが、これは箱内において霧が対流を起こし、電荷分布も同様、この対流影響と箱下部から不定期的に漏れる霧による影響だと思われる。今回、同条件下での電界強度を決定するために、一定条件後60sから115sまでの25s間の電界平均をその条件下での電界強度の値とした。

3.2.4 上部雲のみによる電界と、上部雲と下部雲が重なる場合の電界の比較

図9は下部に電氣的中性の霧を入れた場合と入れない場合での、上部の木板の電圧を-25kVから+25kVまで5kVづつ変化させたときのそれぞれの電界を示す。横軸を木板への印加電圧(kV)、縦

軸を電界 (V/cm) とする。同図より木板に電圧を印加し、その下部に霧を充満させると霧が無い場合に比べ電界絶対値は大幅に上昇する結果となった。これは下部に霧挿入の影響で上部の木板からによる電界が増幅されたということである。霧挿入時での、木板電圧が±5kVの場合、電界は微小にしか変化しないが±10kVでは急激に増加し約±25kVの値付近で飽和していることが分かる。また、+25kVの電圧を木板に印加させ、霧を充満させない場合3.6V/cmと充満させた場合49.20V/cmでは約14倍もの増幅が観測された。

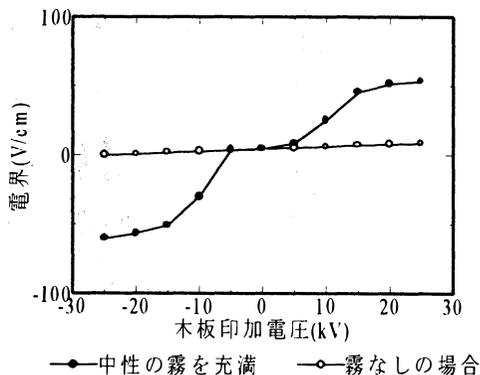


図9 木板に電圧を印加し、霧を入れる場合と入れない場合の電界

3.2.5 二重層帯電雲において上部雲の電界が変化した場合のシミュレーション実験

図10は下部霧の印加電圧を一定にし、上部木板の印加電圧を変化させた時の電界強度を表したものである。横軸は木板電圧 (kV)、縦軸は電界 (V/cm) である。図9と同様に木板印加電圧が上昇すると電界も上昇しているが、噴射する霧の電圧が上昇、つまり帯電量が増加するに伴いそれぞれの電界も増加する事が分かる。また、霧0, ±5kVの3本に注目すると木板印加電圧が±20kV付近で電界は飽和することがわかる。図10中の波線は箱内に霧がない場合つまり上部木板のみからの電界である。例に、木板に15kV印加した場合は、霧の電圧が+5k, 0, -5kVの時は上部木板の電界を強め、-15k, -25kVの時は電界を弱めているということが分かる。

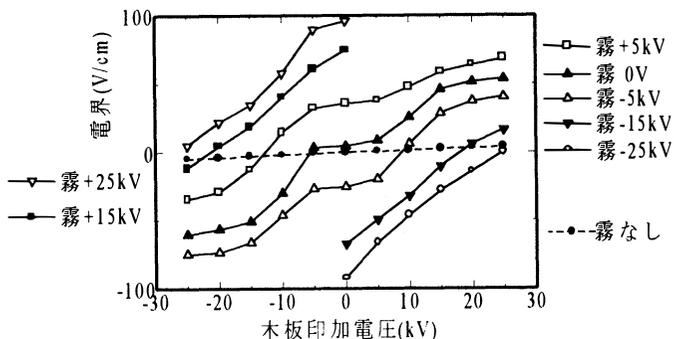


図10 木板に印加する電圧を変化させた場合

例に、木板に15kV印加した場合は、霧の電圧が+5k, 0, -5kVの時は上部木板の電界を強め、-15k, -25kVの時は電界を弱めているということが分かる。

3.2.6 二重層帯電雲において下部雲の電界が変化した場合のシミュレーション実験

図11は上部木板の印加電圧を一定にし、下部霧の印加電圧を変化させた場合の電界強度を表したものである。下部の霧の帯電量を増加させると同時に電界強度も増加することが分かる。また、上部木板の電荷が霧の電荷と異極の時は霧のみの電界 (図11の板0V線) を弱めているということが言える。

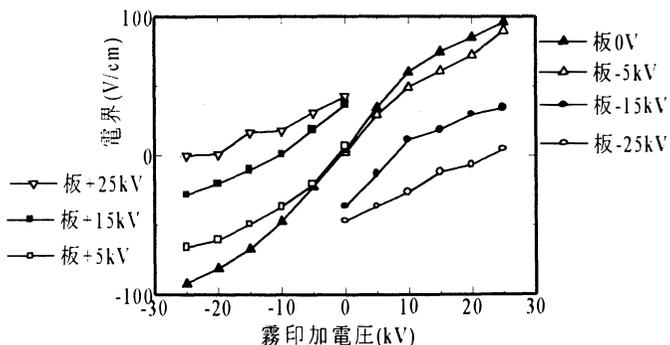


図11 噴射する霧の帯電密度を変化させた場合

3.3 二重層帯電霧における電界変化のシミュレーション実験の解析

3章における二重層帯電霧のシミュレーション実験では上下帯電雲が互いに影響し、地上から見た総合的な電界を作り出すことがわかった。3.2.4節の実験結果について考えてみる。図12左図に示すように3.2.4節ではまず木板に+25kV印加する事により木板は正電荷を持つ。箱内には、霧が充満されていないため電界測定装置は145cm離れた上部木板からの正電荷と、箱下部のアースされた板（電界装置からの距離15cm）からの総合的な電界値を持つ。しかし図12の右側に示すように、電氣的中性の霧噴射を行った場合は、霧

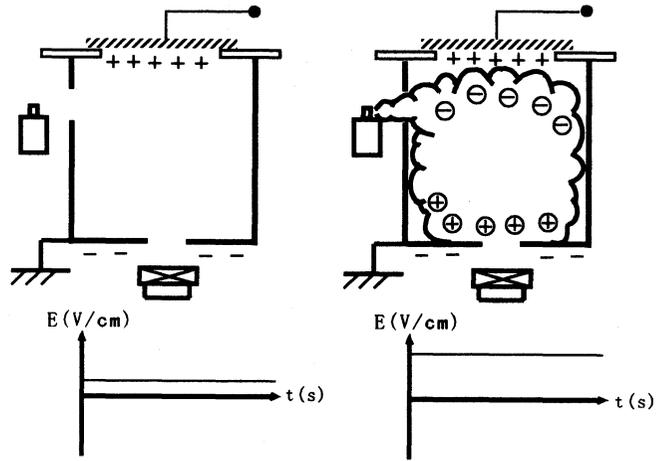


図12 霧を充満させると電界が上昇する模式図

が上部木板の電位によって分極され霧内の負電荷が上部木板に近づき、逆に正電荷が箱下部のアースされている板に近づく。電界測定装置は板の穴から霧の正電荷が接近しているように見える。この正電荷によって電界強度は増加するものと考えられる。また今回の3.2.5節の実験により、充満させる霧が正電荷に帯電した場合はよりいっそう上部の正電荷を持った板からの電界を強める働きがあることがわかった。これは、霧内の正電荷が上部木板の正電荷と反発し、電界測定装置に多量に近づくためだと考えられる。また充満させる霧が負極性に帯電した場合は、正電荷を持った木板からの電界を強める場合と弱める場合があることが確認できた。負電荷の霧の中には多くの負電荷を持つ。しかしその霧中でも少数ではあるが正電荷をも含んでいるはずである。この少数の正電荷が上部木板に反発し下部に移動し電界が上昇するものと思われる。しかし、霧に含まれる負電荷量がさらに増えると電界は分極による正電荷の量よりも霧自体の負電荷の影響が大きくなり電界は降下するものと思われる。また木板に負の電圧を加えた場合でも正負逆に考えることができ同じように分極されることがわかった。

§4 まとめ

4.1 2章のまとめ

2章で述べた実験結果から実際の雲中の帯電過程を考えてみると図13のように雲の帯電量が増加している時に雲中で発生する水滴は負極性を持ち、雲中の帯電量が増加も減少もせず安定している時に発生する水滴は中性である。また雲帯電量が減少する領域では正極性の水滴が落下するものと考えられる。また、負極性の雲の場合でも同じ事がいえ、落下

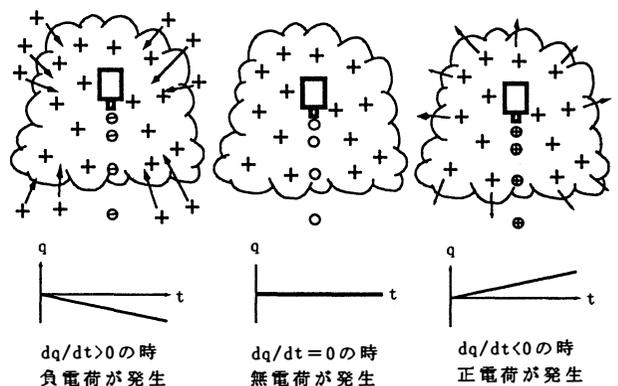


図13 上空での帯電過程の予想

する降雨の帯電過程は上空の雲の電荷変化にも依存されていることが分かった。

この実験では一様な電荷分布を持った雷雲を想定して行った。実際の雷雲中の電荷分布は一般的には上部正、下部負であり、他の様々な帯電過程の要因が考えられる。しかし冬季雷では電荷分布が強風のため横伸びになり局部的にこの実験のような帯電過程による降雨が発生されることが推測される。

4.2 3章のまとめ

3章の実験結果から実際の上空の帯電量が異なる雲塊が重なる場合の電界変化を考えてみる。地上の電界が強まる時(図14, 左図)には下部に中性もしくは、弱い負電荷を持った雲塊が重なったときと考えられる。また地上電界が弱まる時(図14, 右図)には下部に負電荷量の多い雲塊が入り込んでいるものと考えられる。また上部の雲塊が負極性のものについても同様なことがいえる。今回の実験では下部の雲塊は他の雲塊と重なることにより分極などの電荷移動が確認されたが上部からの電界として一定の電圧木板を利用したために上部雲での分極

などの変化を見ることができなかった。実際の異なる電荷量を持った雲塊が重なる場合では上部の雲についても分極を起し総合的な電界強度に影響を与えるものと思われる。しかし今回の実験により地上から一番近い雲塊の電荷が電界値に大きな影響を与えることが分かった。今後は帯電量の異なる雲塊が上下に動いたときの電界, または混ざりあう瞬間の電界変化をシミュレートすることにより落雷が起こりやすい状態はいったいどのような電荷分布を持ったものであるのかということの研究していきたい。

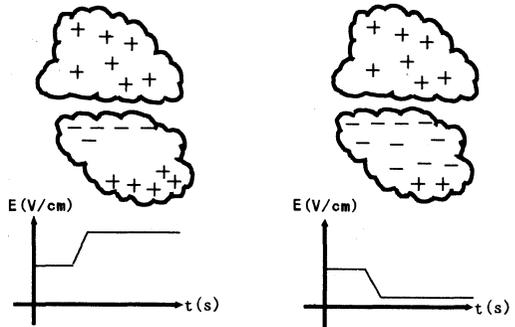


図14 帯電量の異なる雲塊が重なった時の電界変化