

電荷分離と電荷集中の雷雲モデルによる地上電界

加藤 正, 北村 岩雄, 村井 忠邦, 池田 長康

Electric field on the ground owing to thundercloud model with the separated and concentrated charges

Tadashi Kato, Iwao Kitamura, Tadakuni Murai, Nagayasu Ikeda

Electric field on the ground in various charges situations under thundercloud model are calculated for estimation of electric structure of dynamic thundercloud. The real thundercloud has a convection of air current called a cell. It is thought to consist of the upward air current occurring the charge separation and the downward air current with the positive charge. The thundercloud model we proposed is constructed by three dynamic groups of the point charges. First group is negative polarity generated at the lower part of the cloud and stays at the generating position, second group has positive polarity and goes to the top of the cloud and third group goes down partially from the second group charge arrived at the top the cloud and the charge accumulates at some height above the ground. It is found from the parameter survey of the thundercloud model calculation that the amount of the accumulation charge and the height of it are effective parameters for strong electric field on the ground and there is strong electric field enough to cause thunderbolt.

キーワード：電荷分離，電荷集中，落雷，雷雲モデル，地上電界

1. まえがき

北陸の冬季の雷は，強い季節風に雷雲が流され，夏季の雷とは違って独特の電氣的構造を持っているようである。特に雷の持つエネルギーが大きく，ひとたび落雷が起これば，甚大な機器の破壊や停電が発生する。冬季の落雷事故は雪害を伴っていることもあり，何らかの対策を講じる必要があるが，一発雷という特徴もあるため，予測がしにくく，雷雲や雷のメカニズムの解明が求められている。現在，ドップラーレーダーやドップラーソーダーによる降水域のエコーの観測，地上での電界の測定などが行われているが，実際，雷雲がどのような状態の時に落雷が発生するかはまだはっきりと分かっていない。しかし，現在，図1¹⁾に示

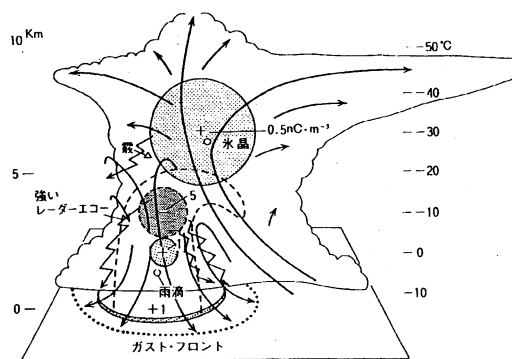


図1 雷雲内の電荷分布モデル

したような電荷分布が雷雲内にあると考えられている。雷雲内には上昇気流と下降気流が存在し、正負の電荷が上下に分布している。冬季の雷雲は、外気温が低く、また、上昇気流がそれほど強くなく、雲頂高度が低い。負電荷の周りとその下の部分は下降気流部であり、強い降雨、降雪を発生するこの部分が強いレーダーエコーの出る部分である。

2. 雷雲のシミュレーションモデル

2. 1 雷雲のモデル

現在、雷雲の電氣的構造は、図1のようであり、雷雲の発達期には上昇気流が主で、その後には下降気流が勢力を持ち次第に雷雲は衰えると考えられている。このことから、我々は上昇気流によって電荷の分離が行われて上空に運ばれ、下降気流によって雲底に集められると考えた。また、図2²⁾に示すようなドップラーソーダーによる風の時間や高度による変化を

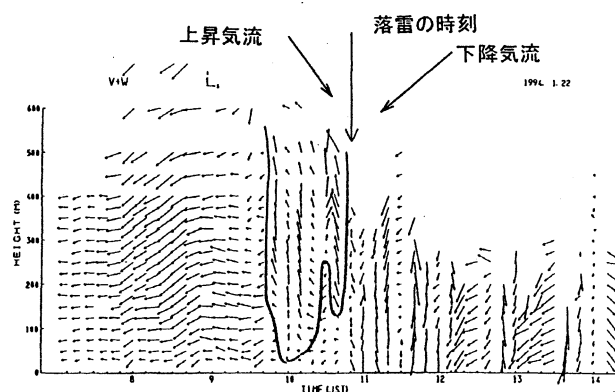


図2 トップラソーダーによる風の時間高度変化

みると、この図の矢印は落雷の起きた時刻を表しているが、この部分では直前まで上昇気流が起きており、その後、強い下降気流に変わっている。これらのことから、下降気流と落雷には何らかの関係があると考え、雷雲内の電荷が気流に沿って移動するとした雷雲の電荷モデルを考案し、地上電界を調べるシミュレーションを行った。このモデルを用いて地上電界を計算し、地上電界がどのように変化していくか、それが絶縁破壊電圧に達し得るかを調べた。また、雲高、雲底、電荷分離速度、上昇気流及び下降気流の速度などのパラメータを変化させた場合の地上電界の計算も行い、雷雲がどのような状態にある時に地上電界が強められるかの検討を行った。

2. 2 計算方法

まず、点電荷群によって構成されるシミュレーションモデルを作成した。それぞれの点電荷による地上電界を計算し、それらから地上電界を求める。シミュレーションを行ったモデルを図3に示す。高度1000mで起こった上昇気流により、電荷の分離が起きる。電荷は連続的に発生すると思われるが、ここでは計算を容易にするため、電荷分離速度 a と単位時間 dt によって決められた点電荷 $q (=adt)$ が一定時間 dt ごとに発生するとした。単位時間ごとに分離した電荷のうち、負電荷は高度1000mにとどまると仮定した。正電荷が速度 v_1 で上昇しているとすれば、時間 dt 後、正電荷は $v_1 dt$ 上空に移動している。この結果、正電荷は縦に $v_1 dt$ の間隔で分布する。上昇する正電荷は、高度 h_u に達すると上昇をやめ、その位置にとどまり、上層電荷 Q_u に加えられる。上層電荷 Q_u の中の一部が上昇気流と距離 d を隔てて降下すると考える。この割合を b とすると、この降下電荷は bQ_u である。残りの電荷 $(1-b)Q_u$ は高度 h_u で新たな上層電荷 Q_u としてとどまる。降

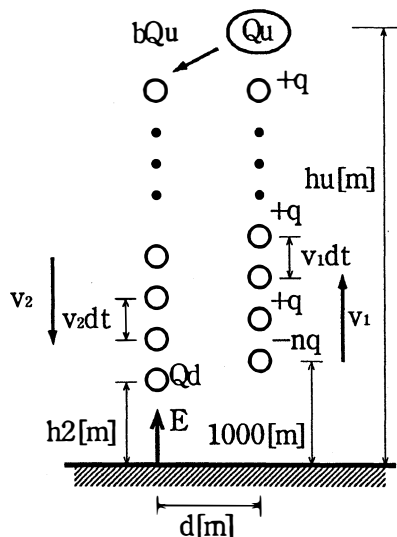


図3 シミュレーションモデル

下した正電荷は高度 h_2 に達すると、そこで集積され雲底電荷 Q_d となる。各時間ごとに、それぞれの点電荷について電界を計算し、それらから正電荷 Q_d 直下の地上電界とした。ここでは上向きの電界を正とした。

具体的な数値例を示す。図3において、 dt を20秒とし、電荷分離速度 a を $1/60\text{C}/\text{min}$ とすれば、この20秒間に発生する電荷量 q は $1/3\text{C}$ で、その他 $d=300\text{m}$ 、 $b=0.8$ 、 $h_2=500\text{m}$ 、 $h_u=5000\text{m}$ 、 $v_1=10\text{m}/\text{s}$ 、 $v_2=5\text{m}/\text{s}$ とすると仮定する。時間0では電荷は発生していない。20秒後には、 $1/3\text{C}$ の大きさの電荷が発生するので、負電荷は高度 1000m に存在し、正電荷は高度 1200m に存在することになり、地上電界はこの2つの点電荷の作る電界の合成である。さらに次の20秒後には、再び $1/3\text{C}$ の大きさの電荷が発生しており、合計 $2/3\text{C}$ の負電荷が高度 1000m に存在し、 $1/3\text{C}$ の正電荷はそれぞれ高度 1200m 、 1400m に達している。そして地上電界はこの3つの点電荷によって作られる。電荷が分離して400秒後、最初の正電荷が高度 5000m に達し、最上層の電荷 Q_u は $1/3\text{C}$ となる。次の20秒後、 Q_u の一部 $bQ_u=0.8/3\text{C}$ が距離 500m を隔てて速度 $5\text{m}/\text{s}$ で降下し始め、高度 4900m に移動している。また、 Q_u の残り $0.2/3\text{C}$ と次に上昇してきた電荷 $1/3\text{C}$ を加えた電荷 $1.2/3\text{C}$ が、新しい最上層の電荷 Q_u になり、次に降下する電荷は $0.96/3\text{C}$ である。電荷が分離して1200秒後、最後の $1/3\text{C}$ が発生し、発生した電荷は合計で 20C となる。最初に降下した電荷 $0.8/3\text{C}$ が高度 500m に達すると雲底電荷 Q_d になり、 Q_d は $0.8/3\text{C}$ となる。20秒後には、 $0.96/3\text{C}$ が、高度 500m に降下してくるため雲底電荷 Q_d は $1.76/3\text{C}$ になっている。このように、電荷を移動させ、0分から40分まで地上電界の計算を行った。

3. 計算結果

3.1 単独電荷による結果

シミュレーションモデルで実際に計算を行う前に、単純に一つの電荷が上昇、または下降する時の地上電界を調べる。

3.1.1 上昇する場合 20C の大きさの負電荷が 500m から 5000m まで、秒速 $10\text{m}/\text{s}$ で上昇した場合の地上電界の変化を図4に示す。始めの方は点電荷が地上に近いので、強い地上電界が生じている。上昇するにつれて電界は弱くなっていく。

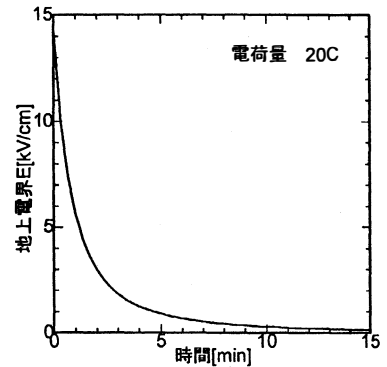


図4 上昇時

3.1.2 下降する場合 20C の大きさの負電荷が 5000m から 500m まで、秒速 $10\text{m}/\text{s}$ で下降した場合の地上電界の変化を図5に示す。上昇の時とは逆に、始めは電界は弱い地上に近づくにつれて、電界は強くなっていく。上空にある時は、弱い地上電界しか示さない電荷でも、降下することによって電界を強めていることが分かる。

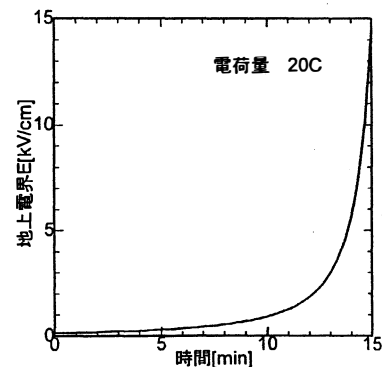


図5 下降時

3.2 シミュレーションモデルによる結果

3.2.1 標準雷雲モデル 図3で説明したシミュレーションモデルで実際に計算を行ってみた。その結果を図6に示す。パラメータはそれぞれ、 $h_u=5000\text{m}$ 、 $h_2=500\text{m}$ 、 $dt=20\text{秒}$ 、 $d=500\text{m}$ 、電荷分離速度 $a=1\text{C}/\text{min}$ 、電荷降下率 $b=0.8$ 、 $v_1=10\text{m}/\text{s}$ 、 $v_2=5\text{m}/\text{s}$ である。以後、このパラメー

タの時の計算結果を標準とし、このモデルを標準雷雲モデルとする。始めは地上電界が正であり、負電荷の作る電界の影響が大きいが、下降気流に乗って電荷が降下するにつれて負に反転し、強い電界が発生している。このことは、正電荷が降下するとともに、負電荷よりも電界に対する影響が大きくなったことを表している。その後は電界の変化が無くなっているがこれは動く電荷が無くなったためである。

3. 2. 2 正電荷直下と負電荷直下の地上電界

標準雷雲モデルによれば、地上に近い電荷が大きく地上電界に影響を与えられるので、標準雷雲モデルの場合で雲底電荷である正電荷直下の地上電界と負電荷直下の地上電界を比較してみた。その結果を図7に示す。正電荷直下の方が電界が強くなっているが、それは、正電荷の高度の方が低く、地上に近いと思われる。

3. 2. 3 正電荷直下の電界

地上電界だけでなく、その100m上空、200m上空の電界も調べた。その結果を図8に示す。点電荷近似であるので、電荷に近ければ電界は強くなる。似たような現象が周囲より電荷密度の高い部分でも起こり得る。何らかの理由で電荷密度にばらつきができ、電荷密度の高い部分ができれば、その周辺から落雷が起こることが予想される。

3. 2. 4 2電荷モデル近似

実際の雷雲では、単電荷ではなく、多くの電荷が分布していると考えられる。そのため、単電荷を50m間隔で並ぶ電

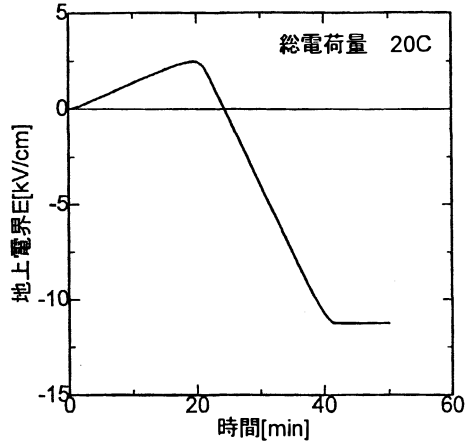


図6 標準雷雲モデルの地上電界

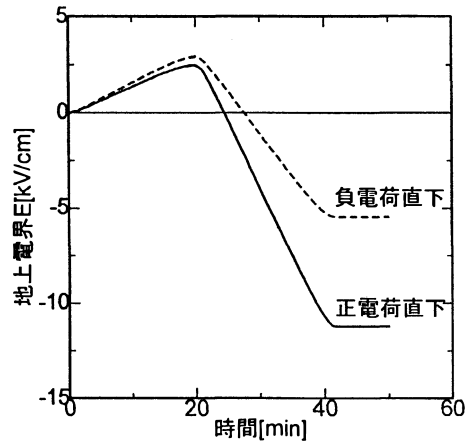


図7 正電荷直下と負電荷直下の地上電界

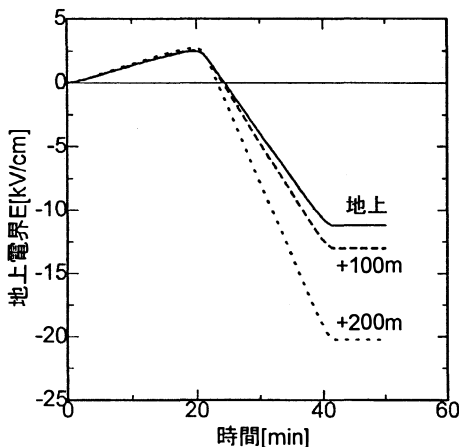


図8 正電荷直下での地上電界

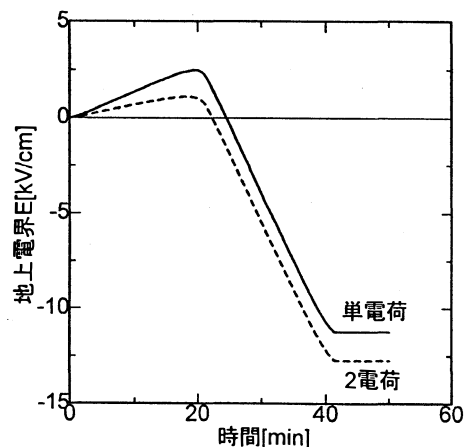


図9 1電荷モデルと2電荷モデル

荷の大きさが半分の2電荷に置き換えて計算を行った。この結果を図9に示す。これより、電荷が分布している方が地上電界が大きくなることが分かる。

3. 3 雷雲モデルのパラメータを変化させた場合

標準雷雲モデルに対して、パラメータを一つだけ変化させて、電界の変化がどのように変わるかを調べた。各図における実線が標準雷雲モデルである。そのパラメータの変化によって地上電界がかなり変わるようであれば、そのパラメータは落雷に大きな影響を与えていると思われる。

3. 3. 1 最上層電荷高度 h_u を変化させた場合

最上層電荷高度 h_u を変化させた場合の電界の変化を図10に示す。上昇速度が同じのために、 h_u の低い方が先に電荷の動きが終わるので、電界の変化が先に終わっている。 h_u が低い方は電荷が全て発生しきらないうちに正電荷の降下が始まっている。これは上昇気流が弱い場合に相当すると思われるが、初期に現れる正の電界のピーク値が小さくなっている。

3. 3. 2 上昇気流と下降気流との間隔 d を変化させた場合

上昇気流と下降気流との間隔 d を変化させた場合の電界の変化を図11に示す。 d が大きいとは風速の高さ方向のシアが大きい場合に相当すると思われる。 d を変化させても電界はほとんど変化せず、 d はあまり関係ないと思われる。

3. 3. 3 下降気流による電荷集積高度 h_2 を変化させた場合

下降気流による電荷集積高度 h_2 は雲底の高さに相当するが、これを変化させた場合の電界の変化を図12に示す。雲底が低い方が地上に近く電荷が存在するため、電界が強くなっている。 h_2 を変化させることによって、地上電界はかなり変化している。

3. 3. 4 電荷分離率を時間によって変化させる場合

標準雷雲モデルは、電荷を1C/minで20分間発生し、合計20C生じる。実際は始めに激しく発生し、徐々に緩やかに発生するようになると思われる。そこでもう一つ、始めの240秒に3C/min、次の160秒に1.5C/min、次の800秒に0.3C/minで合計20分間で20C発生させた。こ

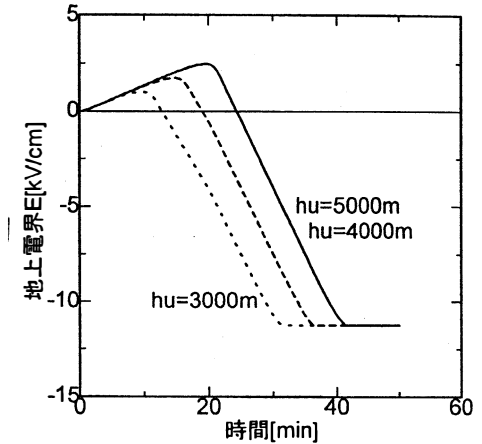


図10最上層高度を変えた場合

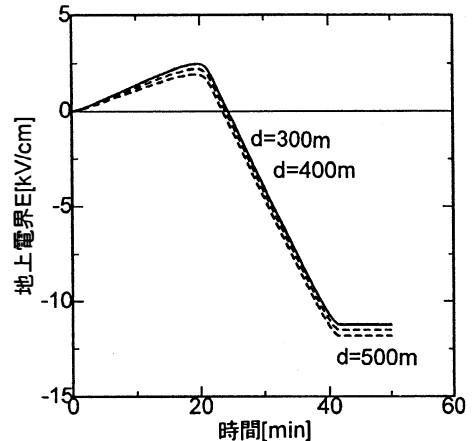


図11 気流の間隔を変えた場合

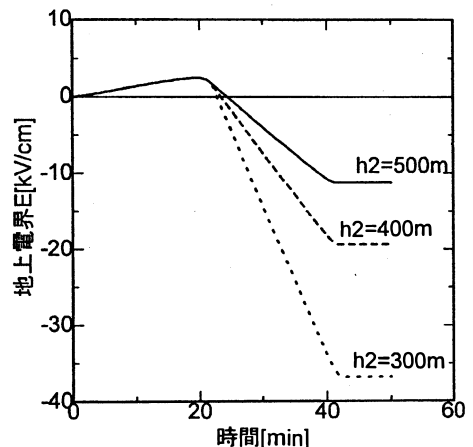


図12 電荷集積高度を変えた場合

の結果を図13に示す。始めの方で移動する電荷が大きいため、標準モデルと比較すると変化の激しい部分が存在する。しかし、地上電界の最大値は等しい値に落ち着いている。

3. 3. 5 電荷降下率 b を変化させた場合

電荷降下率 b を変えた場合の電界の変化を図14に示す。 b を変化させた場合、降下する電荷と上昇する電荷が等しくなるように上層電荷の量が収束する。上昇する電荷はどのモデルも等しいため、どのモデルも降下する電荷は等しくなる。さらに上層電荷は雲底電荷よりかなり離れているため、地上電界に対して影響が少なく、パラメータを変えた影響がほとんど出ていない。

3. 3. 6 正電荷を遅らせて降下させた場合 1

上昇して上層の電荷が、すぐにではなく、一定の時間をおいてから降下を始めた場合の電界の変化を図15に示す。降下を始める時の上層の電荷はかなりの大きさを持ち、上層電荷に対しての割合で降下する電荷が決まるため、降下の始めの電荷は大きく、電界も大きく変化する。

3. 3. 7 発生する電荷の大きさを变化させた場合

20分間で電荷を発生させる電荷を10Cから30Cまで5通り変化させた場合の地上電界の変化を図16に示す。電界の大きさは電荷の大きさに比例するので電荷が大きければ電界は大きくなる。実際は電荷が多ければ、電荷は広がって分布するので、電荷が2倍になれば電界が2倍になる

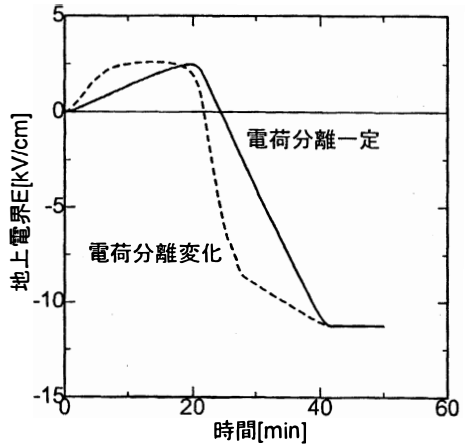


図13 電荷分離速度を変えた場合

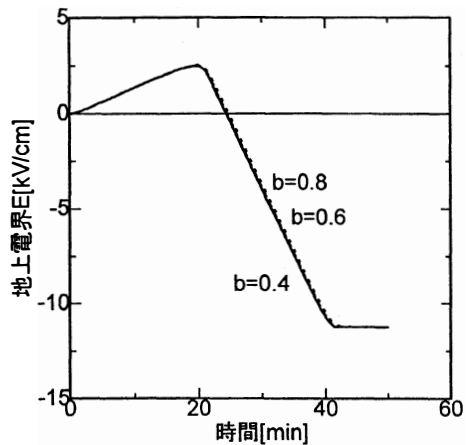


図14 電荷降下率を変えた場合

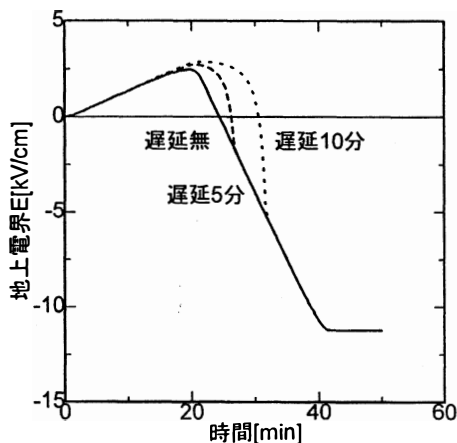


図15 正電荷の降下に遅延を与えた場合 1

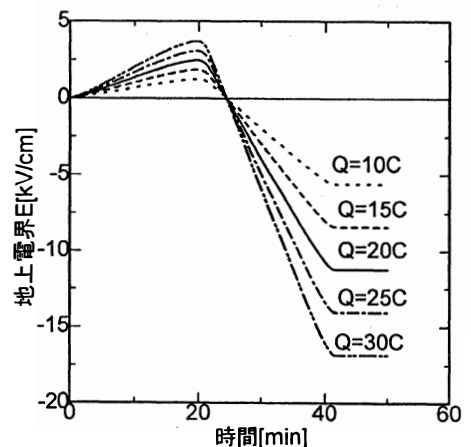


図16 電荷の大きさを変えた場合

という単純なものではないと考えられる。

3. 3. 8 正電荷を遅らせて降下させた場合 2

3. 3. 6と同じことを行っているが、降下電荷を $1/3C$ 一定として、降下電荷を標準雷雲モデルに似せた。結果を図17に示す。3. 3. 6の場合は急激な電界の変化を含んでいるが、この場合は、電界の変化に時間遅れがそのまま現れている。正電荷がすぐ降下しないために、一時的に正電荷が地上から離れ、正の電界のピーク値が大きくなっている。

4 結 論

このモデル計算から次のことがわかった。

- 1) 雲間や霧中での絶縁破壊は 15kV/cm 程度の電界強度といわれているので、地上電界が絶縁破壊を行うのに十分な電界強度を持つ条件が存在する。
- 2) 地上電界は雲底の高さ、分離電荷量に大きく依存する。地上電界のピーク値も同じく依存する。
- 3) 上昇気流と下降気流との間隔及び上層での電荷降下率などは地上電界にほとんど影響を与えない。
- 4) この雷雲モデルから、落雷は下降気流と密接な関係があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 高橋 劭, 雲の物理, 東京堂出版, 1987, p.140
- 2) 小林 文明, 第5回日本海沿岸雷研究委員会資料

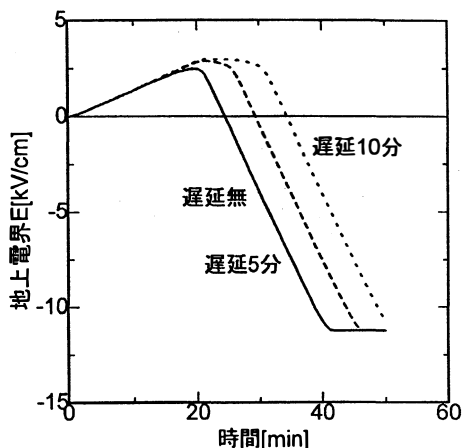


図17 正電荷の降下に遅延を与えた場合 2