

計算機模擬による数種の雷雲構造解析

河野俊彦、今井光祐

Numerical Analysis of Several Thunder-Clouds By Computer Simulation Method

Toshihiko KOUNO and Mitsuhiro IMAI

In the latest highly information-oriented society, electronic circuits and electric power system were most important equipment. These electrical equipment easily take out an obstacle to lightning. We analyze to the mechanism of thunder-clouds by computer simulation method, for the lightning prediction. We understood that the influence of Ion layer as third positive charge group and the positive charge layer as top of thunder-cloud were cleared respectively and numerically. The influence was not greatly to the electric field on the earth's surface, but these layer with suitable quantity and proper position were indispensable for this simulation.

Also, we understood that the distribution of electric field on the thunder-cloud's bottom surface at immediately after the struck by lightning was cleared as numerically.

Keywords: Computer Simulation, Thunder-Cloud, Electric Field

キーワード: 計算機シミュレーション、雷雲、電界

1. まえがき

計算機を始めとする電子機器の多様な活用によって、現在の高度情報化社会は構成されている。また、これらの電子機器を働かせる他、総てのエネルギー源として用いられる電力設備は機関設備として最重要である。これら電子機器および電力設備は、瞬時的とは言え、膨大なエネルギーを持つ落雷現象に付随して発生する電磁ノイズによって、決定的な被害を受け易い。

勿論、これら個々の機器には避雷設備を十分に設けて雷からの防護を計り、出来るだけ被害を軽減させる研究も盛んに行われている。しかし、雷のエネルギーが非常に大きい場合や極近傍に落雷した場合には、被害を避け得ないので、雷そのものを根本的に研究し、落雷の発生位置と時刻を予測し、適確に対処する方法を研究して、雷による被害を無くする研究が望まれる。

更に、自然現象としての雷雲構造や雷放電の理解は人類永遠の課題でもある。

本研究は、上記の立場で、雷現象の根本的解明をめざして、自然現象として多様な形態があると予測される雷雲の構造を、その電荷配置によって周囲の空間及び地表面に生ずる電界分布に着目して、計算機によるシミュレーション手法を用いて、解析するものである。

2. 電荷配置から見た雷雲構造

夏季に発生する積乱雲として良く知られている雷雲は、雲底の地上高は4 km、雲の頂上は10 kmにも至って垂直型に構成されている。その電荷配置構造はこれまでの筆者等の研究により、以下の様に把握されている^{1) - 3)}。

即ち、気温 -10°C の高度(地上高は約5 km)付近で、熱せられた地表面付近からの暖かい空気の上昇気流とその高度での冷気による霰や氷晶とがぶつかり合う乱気流の中で、正に帯電する粒子と負に帯電する粒子とに分かれる。正に帯電した粒子は氷晶の様に表面積の多い形状のせい、雲頂上まで

上昇し、正の電荷群を構成する。また、負に帯電した粒子（過冷却水滴等）は比較的流線型をしていて、雲底付近に停滞して、負の電荷群を構成する。積乱雲としての垂直に発達した一塊の雷雲内の電荷的構造は以上の如く2電荷群からなるが、その下方、地上高が約2 km 付近に、正のイオン層が一定量存在しなければならないことも、我々のこれまでの電界シミュレーションによって解明されている²⁾。

即ち、落雷現象を発生させるまでに十分に発達した雷雲の雲底部には、この系での最大電界の値として、空気の絶縁耐力を越える電界になる必要がある。その電界は、4 km 上空では気温と気圧の両方の低下によって、標準状態の空気の絶縁破壊電界よりも低下するが、筆者等は既報に、その地上高と破壊電界低下の割合との関係式を示し、1700 kV/m 程度であるべきだとしている¹⁾。一方、落雷時の地表面における電界は、ロケット誘雷実験の際、ロケットを打ち上げる瞬間の地表面電界と打ち上がったロケットに誘雷した時の高度との関係を表わす実験結果⁴⁾から、ロケットを打ち上げ無くとも落雷するであろう電界として、16 kV/m を得ている。

この2箇所の電界を指定する境界条件を与えることから雷雲内の電荷量や電荷配置と共に、その空間での電界分布を知ることができる。しかし、正、負の2電荷群だけでは良い解が得られない。そこで、一部観測された例もあるイオン層を、雷雲と地表面との中間位置（地上高2 km）に、ある一定量の正の電荷群として配置すれば適当な解が存在することを示した。これにより、雷雲を電荷配置の面から見れば3層の電荷群からなることが解っている¹⁾。

今回は、以上の様な代表的配置による電荷3層構造での電界計算による雷雲下の電界分布と対比する形で、考え得る幾つかの特定な電荷配置による電界の様子を検証したので報告する。

3. 幾つかの特殊な雷雲構造下の電界分布

雷雲は上昇気流の勢いや上空での水分量の大小によって、様々な発達過程を持つ事が予想される。

以下に、その様々な雷雲構造における電界分布について検討するが、先ず、上記の電界計算手法により、最も代表的な電荷配置を持つ雷雲構造として、第1表の様なパラメータを持つ雷雲下での電界分布を得ているので、既に報告済みではあるが比較の為にここに再録する²⁾。

尚、表中の電荷層高度は、各電荷群の底面の地上高を表わしている。Fig. 1 にその電荷群配置の概要

を示す。そして、その時の地上電界分布を Fig. 2 に実線で示す。

Table 1 Parameter of thunder-cloud used for the calculation of electric field. (表1)

雷雲	頂上部の正電荷層	雲底部の負電荷層	イオン層正電荷層
電荷層高度 (k m)	9	4	2
各層の底面 (k m ²)	1 × 1	1 × 1	1 × 1
各層の厚さ (k m)	1	1	0.5
電荷量 (C)	+73.5	-73.5	+13.5
電荷分布	一様	一様	一様

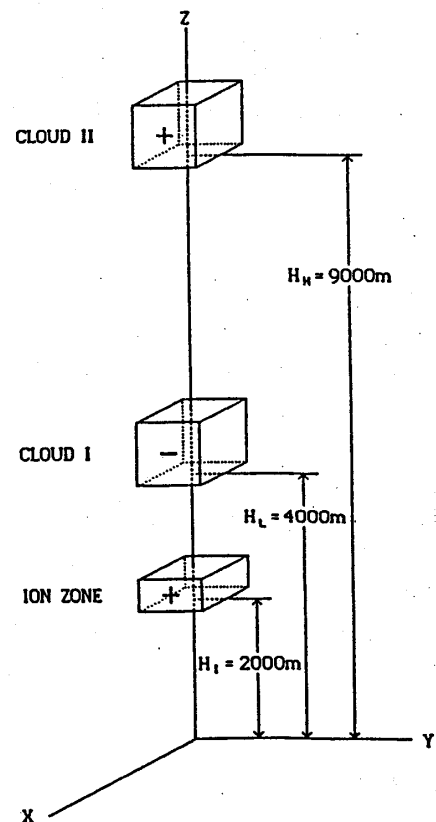


Fig.1 Arrangement of standard model of thunder-clouds (CLOUD I & II) with an Ion zone.

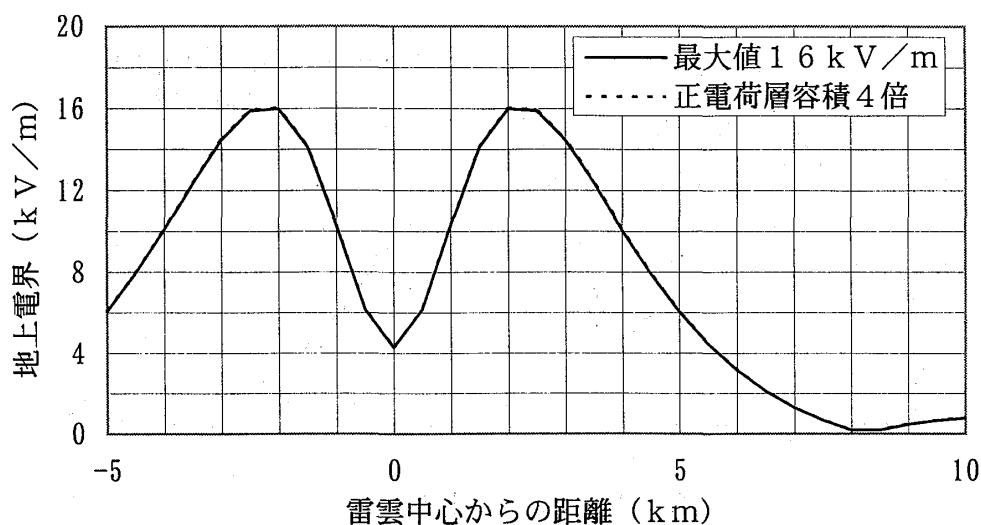


Fig.2 Calculated electric field at the earth's surface level, under the model thunder-clouds (smooth line), and under the model with expanded positive charge layer as top of cloud (dotted line). There are almost same value.

3-1. 雲頂部正電荷群の分布範囲の違い

雷雲はその発達の初期に於いては、強い上昇気流によって垂直方向に発達するが、より上昇すると、高度が上がると共に、気圧がより希薄になるので、拡散によって、水平方向への広がりが見えて来る。

その場合の、雷雲パラメータとしては、Table 1 の内、次の様な変化を与えた。変えたパラメータのみを記す。

雷雲	頂上部の 正電荷層	雲底部の 負電荷層	イオン層 正電荷層
各層の底面 (km^2)	2×2	1×1	1×1

この場合の地上電界分布に現れる違いを Fig. 2 に点線で示したが、図では先の代表的配置における結果と一致していて全く重なっている。電荷層の中心軸を合わせて、底面積を4倍にしたこの場合には、ほとんど差が無い結果を得た。

次に、地上高1万メートル付近の気流はしばしば雲底付近(地上高4 km)の風速と異なり、速い場合があり、強い上昇気流の中心軸より風下に広がりを呈するので、同様に頂上部の電荷層の体積を4倍にして、その中心軸を Fig. 3 のように水平方向に

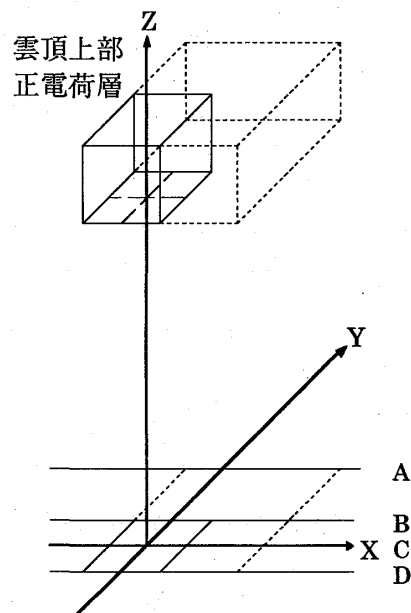


Fig.3 Arrangement of another model with positive charge layer tended to the direction of the wind, showed without Cloud II & Ion zone, in this Fig..

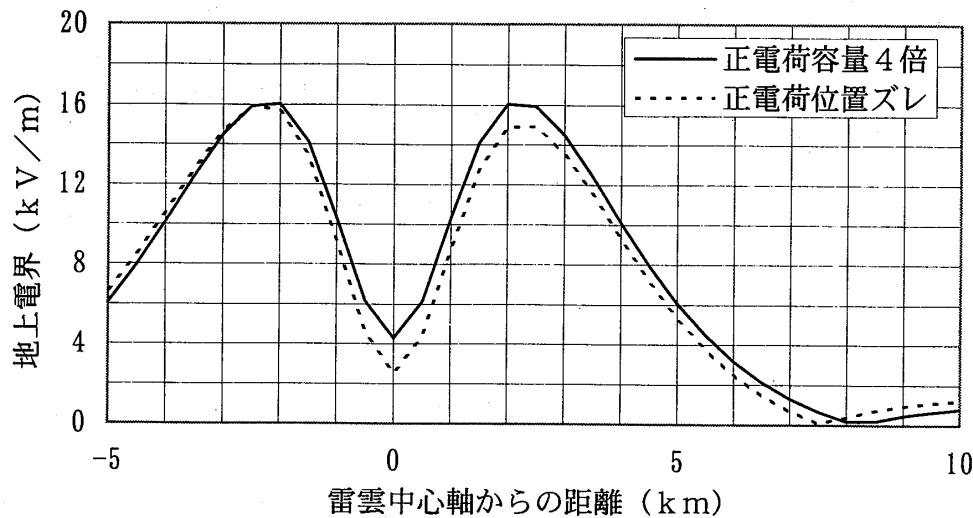


Fig.4 Calculated electric field at the earth's surface level, under the tended model of thunder-clouds(doted line), and under with just expanded positive charge layer as top of the cloud (smooth line).

ずらせた、積乱雲の写真で良く見られる金床状の雷雲の場合における地上電界分布を Fig. 4 に示す。

この場合、当然ながら、ずらせた方向の電界分布の様子が少し異なる様子が分かるが、それでも大差は無い。現実の雷雲がどの様な形であるかは地上電界の分布を見てもあまり分からないことになる。逆を言えば、頂上部だけが多少の範囲の違いがあっても、地上電界に及ぼす影響は少ないと言うことである。即ち、このようなシミュレーションにはその層の総電荷量が一定であれば、頂上部の形(範囲)が少々違っていても、地上電界分布はほとんど変わらないことを示している。

そして、今回は各電荷層内の電荷分布は総て一様としているが、各層の総電荷量一定として、中心部ほど電荷密度が高いとした場合の地上電界に現れる違いも少ないことが分かっている。

3-2. イオン層正電荷群の分布範囲の違い

積乱雲としての雷雲よりも更に地表面に近い所に想定しているイオン層の形成原理は、不明であるが、我々の解釈では次の様であるとしている。

先ず始めに、地表面が熱せられて、強い上昇気流により積乱雲は形成し始める。その発達段階で、正、負電荷の2層に分離し、周辺の電界が強まり、地上付近の構造物や地形形状、そして、樹木など先端が尖鋭な地上高の高い物質付近では、微小コロナが発

生してイオン化が生じる。及び、自然界に存在する電荷をも含めて、正の電荷を持つ粒子が、積乱雲底部の負の電界に引かれて上昇するが、その帯電粒子の質量による重力とのバランスする位置に停留した層をなすであろう、と解釈する。従って、イオン層の範囲は、積乱雲の底部の面積と同等の範囲として想定したものを、前述の代表的なパラメータとしたが、この範囲を変化させて、その地表面電界分布への影響を調べて見た。諸パラメータの内、Table 1 から変化させた部分のみを示すと次の2通りである。

その1

雷雲	頂上部の 正電荷層	雲底部の 負電荷層	イオン層 正電荷層
各層の底面 (km^2)	1×1	1×1	0.5×0.5

その2

雷雲	頂上部の 正電荷層	雲底部の 負電荷層	イオン層 正電荷層
各層の底面 (km^2)	1×1	1×1	1.5×1.5

イオン層の範囲を $0.5 \times 0.5 (\text{km}^2)$ および、 $1.5 \times 1.5 (\text{km}^2)$ としたのは、第2図に示した

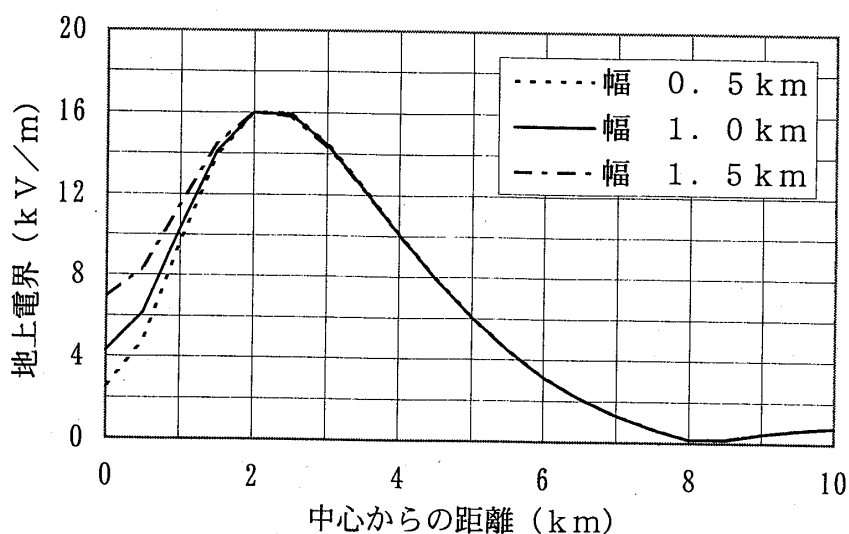


Fig.5 Calculated electric field at the earth's surface level, under three models of thunder-clouds with different area of Ion zone.

最も代表的なパラメータによる地上電界分布から見て、中心軸の左右に現れた2つのピークの位置がそれぞれ原点から左右に2 km離れた位置にあることと関係がある。即ち、中心軸あたりの地上電界の低下は、最下段に存在させたイオン層の正電荷群の影響によるものであり、もしイオン層が存在しなければ、中心軸が一番強い電界の場所となる。発達の初期段階では、先に述べた様に、積乱雲内の正、負の2電荷層からなっており、その時の地上電界は中心軸が最も高い電界を示している。この付近の平面状の場合の電界として、ある一定値以上の電界を示す範囲内の所で、高い構造物等の先端の電界が高くなりイオン化が起きるとして、その範囲をどう取るかは、先端の形状等で違いがあるので明確には求め得ない。よって、積乱雲の底面の一边が0.5、1.0、1.5 kmの三つの場合の地上電界を示して、その違いの程度を比較検討した。その計算結果をFig. 5に示す。同図によると以下のことが分かる。

イオン層内の電荷量を一定にして、その分布領域を上記のように変えた場合には、狭くして中心軸に集中させた形の、幅500 mにした場合に、地上電界の中央付近が一番大きく低下するだけで、地上電界の最大値は、その位置(中心から約2 km)も、値(16 kV/m)も変わらないことが分かった。ピークの位置より遠ざかれば、何れの場合も同じである。

3-3. 2つの雷雲セルが隣接した場合の地上電界

次に、2つの同様な電荷構造を持つ雷雲セルが隣接して存在する場合の地上電界の様子をシミュレーションする。

このような例のモデルとして、左に配置する雷雲セルAは、これまでの第1表のパラメータを有する最も代表的な雷雲とし、その右には雷雲セルBを、左の雷雲セルAに比して、80%の電荷量を持たせ、その他のパラメータは全く同じに設定して配置させた。その2セル間の間隔(セルAの雲の右端とセルBの雲の左端との距離)をそれぞれ、1、3、5 kmとした場合の地表面での電界分布をFig. 6に示した。両セルからの電界の重畳により、地表面での電界は、高くなっているのが分かる。雷雲セルの間隔を5 kmとして、雲底の地上高4 kmよりも大きく取った場合でも、16 kV/mを越えて、26 kV/mにまで高まっていることが解った。自然界に於いて、多くの場合に、このように接近したセルが隣り合うケースが多いと思われる。

3-4. 落雷によって中和された直後の地上電界

さて、上記の様にいろいろな場合の電荷構造を持つ雷雲が、最大限の電荷を貯えた時、空気は絶縁破壊して、閃光を伴った雷放電が発生する。この1回の落雷により中和される電荷量は、代表値としては

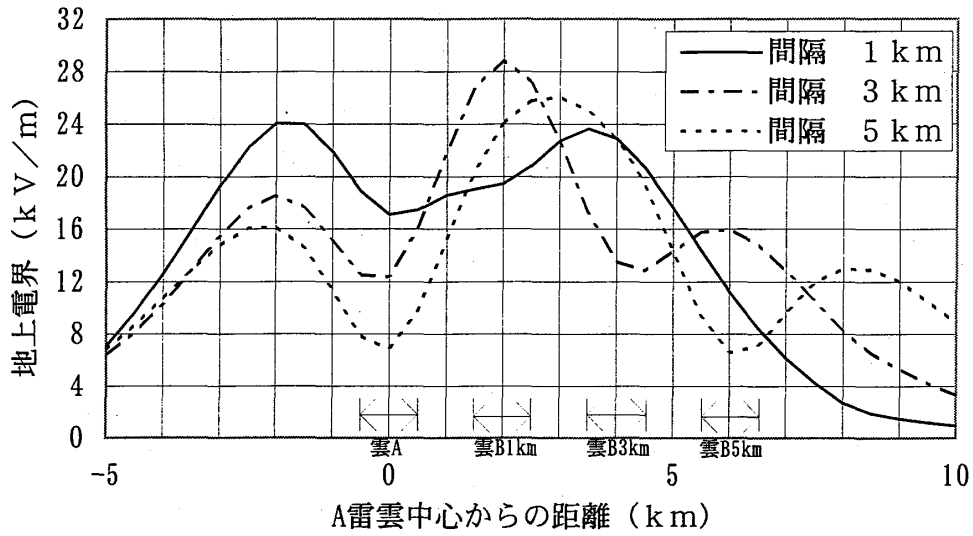


Fig.6 Calculated electric field at the earth's surface level, under neighbored two cells of model thunder-clouds .

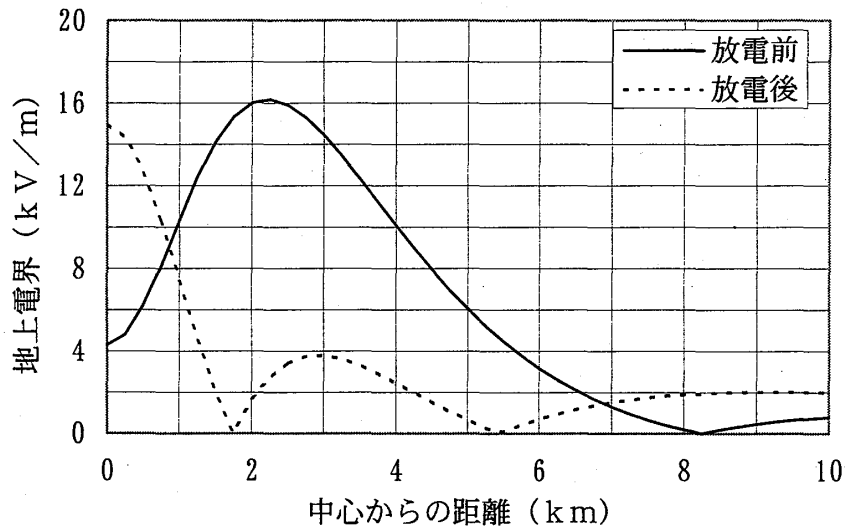


Fig.7 Calculated electric field at the earth's surface level, at the instant of immediately after lightning discharge. Then, negative charges of 20 coulomb are lost in the bottom of thunder-cloud.

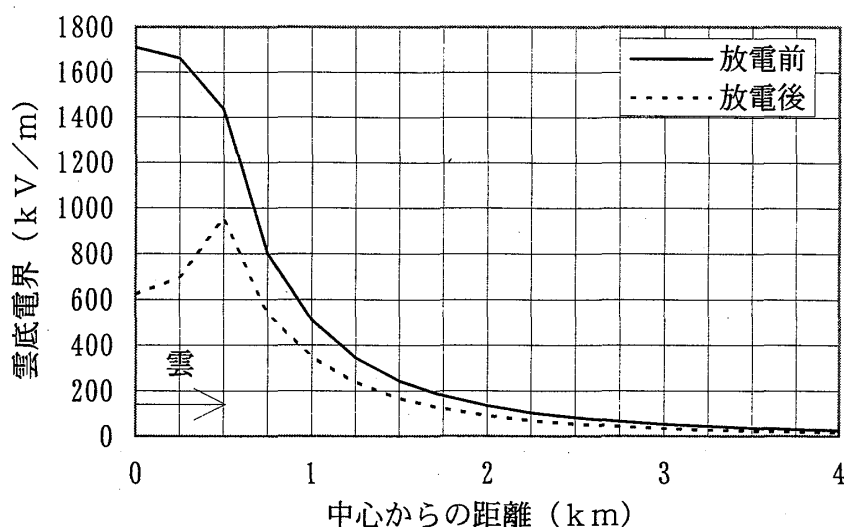


Fig.8 Calculated electric field at the bottom level of the cloud, at the instant of immediately after lightning discharge. Then, negative charges of 20 coulomb are lost in the bottom of thunder-cloud.

20 Cであるとされている。勿論、多重雷もあり、放電路の長短もあって、1回の雷放電で中和さる電荷量は大小あるであろうが、その代表値として、この20 Cが中和されたとして、次の様に考える。即ち、雷雲内の電荷は、金属電極に貯えられているのでは無く、氷晶などの粒子に付着した形で、離散的に存在している。この離散的な電荷を雲内放電の形で寄せ集めて20 Cを地球の表面に現れた反対極性の電荷とを一筋の放電路によってつなぎ中和させるのである。とすれば、雷放電の出発点となる雲底のある一点から、どの範囲にある離散的な電荷を寄せ集め得るのであろうか。このことは雷放電の現象として興味ある問題である。

そこで、これまでの電界計算のモデルとした代表的な雷雲は、雷雲の大きさを上記 Table 1 の様に定め、その各電荷層の内部では一様分布として扱っている。この様な離散的点電荷の総和が、20 Cになるとした場合には、その点電荷は一辺が約 650 m の立方体の中に存在することになる。この範囲の負の電荷を雲底部中心点から取り去った場合の、地上電界分布は Fig. 7 に示す通りである。また、雲底面の水平位置での電界分布は Fig. 8 の様になる。ここでは、空気破壊電界 (1700 kV/m) は存在しないので、電荷の再配置を待って、次の雷放電は発生するであろうことが分かる。

4. おわりに

われわれは雷放電に伴う電磁ノイズによる情報機器への障害を皆無にすべく、雷雲の構造及び雷放電について、根本的な解釈を試みている。また、それをシミュレーションにより再現し、落雷のメカニズムを明らかにして、防雷システムを構築しようとしている。そのためには、現実の雷雲及び雷放電の観測データとして、何が必要かを本研究を通じて明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 河野、今井：計算機シミュレーションによる落雷条件を考慮した雷雲下の電界計算、Res.Lett. on Atmos.Electr.,8,91-97、('88)
- 2) 今井、黒飛、河野：雷雲電荷モデルと雷放電開始電界の検討、電気学会放電研究会資料、ED-91-164、('91)
- 3) 今井、河野：雷雲内における空気破壊電界について、福山大学工学部紀要、第 18 号、65-69、('94)
- 4) 桜野、他：冬季雷雲の規模からみたロケット誘雷の特徴、電気学会論文誌 B, Vol.106-B,685-692、('86)