

計算機による雷雲下の電界シミュレーションと 落雷条件の検討

河野 俊彦*, 今井 光祐*

Simulated Electric Field under a Thundercloud and the Threshold Field for Lightning Struck

Toshihiko KOUNO and Mitsuhiro IMAI

ABSTRACT

In this paper, the simulated electric field under a thundercloud and the condition of threshold field for lightning struck are described.

The electric field was calculated with boundary conditions of 0 voltage and 15 kV/m at the surface of the earth. In this simulation, an ion layer stayed at the midgap between the earth and the bottom of thundercloud became to be necessary to get the threshold field intensity for the breakdown in the atmosphere.

The threshold field intensity is formularized as the function of the pressure and temperature according to the height from the sea level. And, two formulae are shown; one for summer and one for winter.

キーワード：雷，計算機シミュレーション，電界計算

1. はじめに

わが国の情報化社会への進展は情報機器，システムなどのハード面から目覚ましい。これに対して，周辺の装置や機器の対応も遅れを生じる分野が現れないよう各分野でバランスある発展が必要である。

そのなかで，電磁波による計算機障害に関する研究にも注目して行かなければならず，現に自動車のコントロールを司る制御用計算機の電磁障害によるミスが社会問題になっている。

障害の要因となる電磁波の中で最も一般的な高エネルギーの障害要因は雷現象に伴うものである。これまでの雷の研究は主として基幹エネルギー問題として，電力送電線への障害の立場から行われて来たが，今後は計算機障害の立場から大いに注目して行かなければならない。

本報告は，雷現象からの電磁エネルギーを計算するなどして計算機障害との関係を直接研究するものではない

が，まず，その要因となる雷現象そのものを研究し，出来ることなら，雷の発生を無くせないかと考える立場に立つものである。

これまでに，雷雲の電荷を実測する研究報告¹⁾，雷雲構造の研究報告²⁾，および雷雲の電界計算例³⁾などの研究があるが未だ十分な解明に至っていない。

雷雲内電荷の生成機構についての報告は最近はあまり見られず，生成された雷雲電荷群からの空間電界がどのように分布しているかについて地上電界分布は測定と計算から報告されているが，その最大電界が空気破壊電界とどう対応しているかについての研究は殆ど見られない。

本報告では，上層大気条件から各標高位置に於ける空気破壊電界を推定し，また一方に於ては，空間電荷群を想定した計算機による電界分布シミュレーションを試み，かつ，両面から雷雲下の様相を検討している。

2. 標高位置と空気破壊電界

地表面を覆う大気は標高と共に希薄になり、気温も低下することは良く知られている。一方、破壊電界はパッションの曲線に従って気圧と共に変化すること、および、気温の変化による空気密度の違いによっても変化することは放電研究の関係者には周知のことである。両者の実際の把握が有って、各標高に於ける空気破壊を知る事ができる。

ここでは、長年掛けて積み上げられたデータに基づく東京天文台編集の「理科年表」記載になるデータをもとにして、夏季雷雲状態と冬季雷雲状態での各雲底付近を含んだ範囲の気体状態を把握し、これから各標高に於ける空気破壊電界を算定している。

まず、夏季においては、雷雲は積乱雲となり、垂直に発達上昇する。このような雷雲の雲底は標高4 km、雲の頂上は最大15 km 程度にも達する。

先の文献6)によれば、この範囲での大気状態は標高11.1 km に気温の特異点があるが、気圧も気温もほぼ直線的に低下することが測定結果として示されている。

これから測定結果をまとめて、図1に表現した。

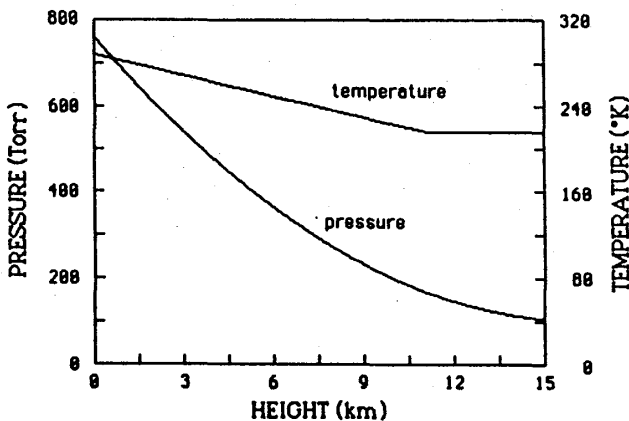


Fig.1 Pressure and temperature of the atmosphere as a function of the height ; summer season [After The Tokyo Astronomical Observatory : "rika nenpyo"].

同図からカーブフィッティング法により、標高の関数として気圧、気温を下式のように表した。

$$\begin{aligned}
 P &= 2.52 \times (16.15 - h)^2 + 102.7 \\
 T &= -6.49h + 288.2 \dots \dots [h \leq 11.1] \\
 T &= 216.7 \dots \dots \dots [h \geq 11.1] \\
 &\dots \dots \dots 1)
 \end{aligned}$$

但し、P : 気圧 Torr, T : 気温 K, h : 標高 km

次に、冬季に於いては、雷は主として日本海沿岸に発生し、雲底が低いことが知られている。この場合、雲底

は2 km 前後で、雲の頂上もあまり高くなく、せいぜい、5 km 程度であろう。このことは、冬季に於いては、既に地表面付近で気温0℃となっているので、雷雲の電荷が分離生成されると考えられている-10℃の標高位置が低くなるからである。このような条件を満足する場所としては石川県輪島市を選ぶのが最も良からう。この上空のデータは気象学的にも重要とされていて、豊富である。

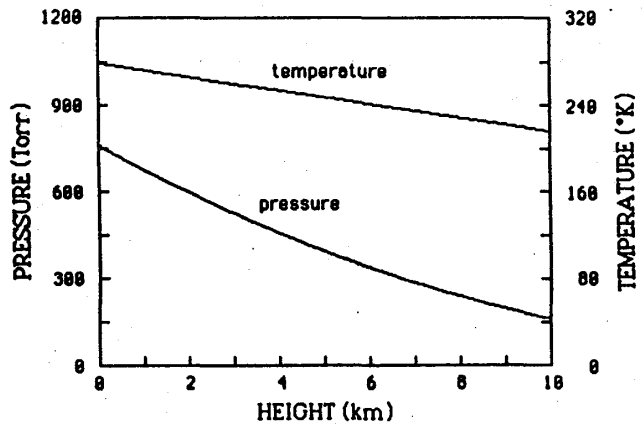


Fig.2 Pressure and temperature of the atmosphere as a function of the height ; winter season [After The Tokyo Astronomical Observatory : "rika nenpyo"].

冬季の大気状態を、「理科年表」のデータから図2に表現した。そして、同図からカーブフィッティング法により、標高の関数として気圧、気温を下式のように表した。

$$\begin{aligned}
 P &= 2.65 \times (h - 16.3)^2 + 56.5 \\
 T &= -6.30h + 279.0 \dots \dots [h \leq 9.0] \\
 &\dots \dots \dots 2)
 \end{aligned}$$

以上により、各標高位置に於ける大気の状態を数式化することが出来たので、これを用いて、以下のように各標高に於ける空気破壊電界を求める。

空気の破壊電界は、大気状態の変動によって異なるので、ある標準状態に換算して取り扱われるが、ここではその逆変換によって、標準状態(15℃, 760 Torr)の空気破壊電界(25 kV/cmとする)から各大気状態に於ける空気破壊電界を算出するものである。

上記考えから直ちに求め、夏季、冬季共に使用出来る式として下記式が得られる。

$$\begin{aligned}
 E &= 25.0 \cdot T_0 / P_0 \cdot P / T = 9.48 \cdot P / T \\
 &\dots \dots \dots 3)
 \end{aligned}$$

但し, T_0 : 標準気温 ($t + 273$) K, $t = 15^\circ\text{C}$
 P_0 : 標準気圧 760 Torr

上式に 1), 2) 式を代入して, それぞれ夏季, 冬季の雷雲雲底付近の空気破壊電圧を知ることができる。

そして, 得られた計算結果を図に表すと, 夏季に対して図 3, 冬季に対して図 4 となる。

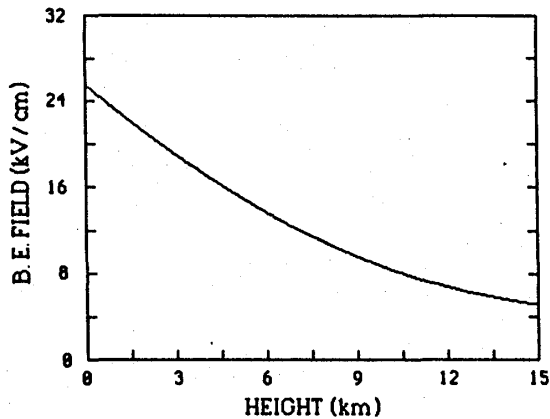


Fig. 3 Magnitude of the breakdown electric field as a function of the height; summer season. We assume the magnitude of the breakdown electric field at sea level is 25kV/cm.

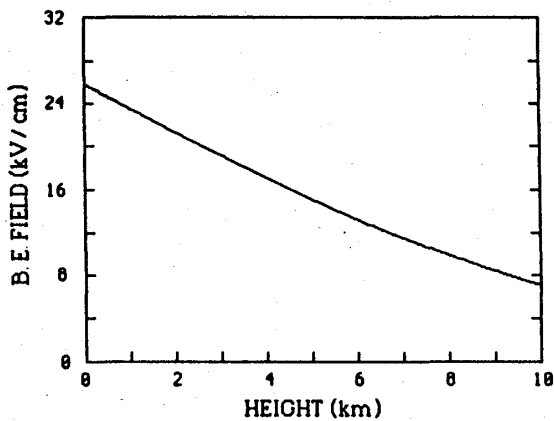


Fig. 4 Magnitude of the breakdown electric field as a function of the height; winter season. We assume the magnitude of the breakdown electric field at sea level is 25kV/cm.

これらの図から, カーブフィッティング法により, 夏季, 冬季それぞれに, 標高 h [km] の関数として下 2 式を得ることができる。

夏季に対して,

$$E_s = 6.72 \times 10^{-2} (h - 17.6)^2 + 4.67$$

$$\dots\dots\dots 4)$$

冬季に対して,

$$E_w = 5.14 \times 10^{-2} (h - 23.4)^2 - 2.30$$

\dots\dots\dots 5)

但し, E_s : 夏季に於ける破壊電界, E_w : 冬季に於ける破壊電界で, いずれも, 単位は [kV/cm]

これらの式によれば, 典型的な夏季雷の雲底付近 4 km の標高では 17.1 kV/cm, 典型的な冬季雷の雲底付近 2 km の標高では 21.3 kV/cm, で空気は絶縁破壊するとの結果を得た。

3. 雷雲下空間の電界計算手法

雷雲の生成には未だ定説はないが, 雷雲の電荷模擬のために, われわれは次のように理解する。

則ち雷雲は, 大気温度が -10°C 程度になる標高に於て, 乱気流にもまれ氷滴や過冷却水滴が互いに衝突・分裂などを行って, 電荷を帯び, 上昇気流に乗って, 正極性の電荷を帯びた粒子が高層に移動して構成される。

かように, 離散的に分布した電荷群が下層に負極性, 上層に正極性と分離していて, 金属導体に帯電したものと異なっている。

従って, より自然の雷雲に近づけるためには, 電荷素の密度を高めた離散電荷群により電界計算を試みる必要があろう。しかし, 電子計算機によるこの種の計算では計算時間が長くなることから, 要求される精度との関係で適当に選択する必要がある。

さて, われわれが用いた電界計算手法は, 正極性と負極性からなる 2 つの雷雲模擬の点電荷群から, 空間の任意の点 P に与える電位として, まず電位を求める形で行った。

電荷群の配置を図 5 に示す。地表面 ($z = 0$) を 0 電位とするので, z 軸のマイナス側にイメージ電荷群を配置している。それぞれの電荷群はここでは, 幅: W (x 軸方向), 奥行き: d (y 軸方向), 高さ: h (z 軸方向) からなり, その大きさは km 単位である。そして, 下層電荷群の下面の高さ: H_L , 上層電荷群の下面の高さ: H_H とする。

この配置に於て, 計算を実施するが, ここでの境界条件としては次の 2 点がある。まず, 地表面で電位 0 と言うこと。次に, 実測により落雷可能の場合の地上電界がほぼ 15 kV/m とされているので, 模擬雷雲となる電荷群の $x - y$ 面で中心となる位置から垂線を降ろした地表面で電界が上記実測値となること。

この他に計算実施に当たって与える条件として点電荷

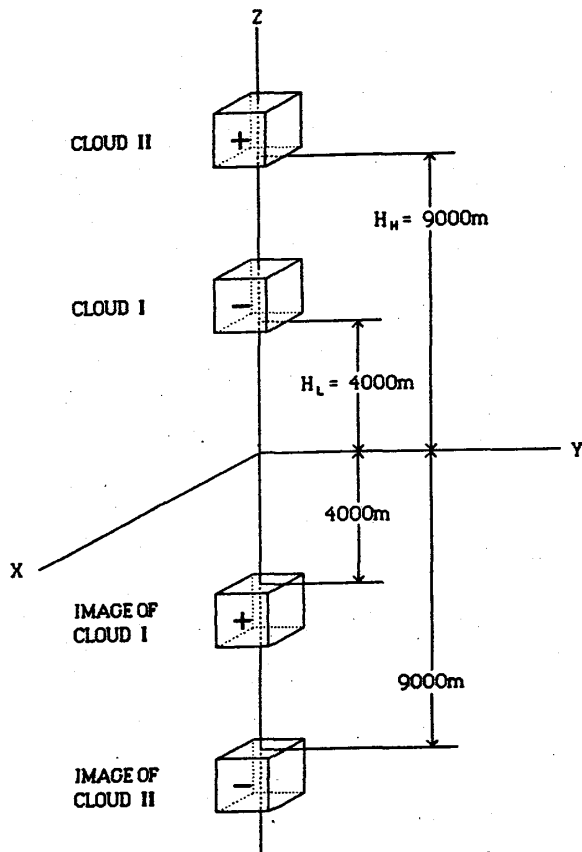


Fig.5 Arrangement of model thunderclouds for the computation of the electric fields.

の数がある。これは、上記のように精度と計算速度の兼ね合いとなるが、ここでは、立方体である電荷群の x , y , z 軸方向のそれぞれの長さ w , d , h を 1 , m , n 相当する形で与えた。

このような条件の下に得られる結果としては空間各点の電位、電界、および、電荷量がある。則ち、境界条件として地上のある点の電界を与えれば、その他の各場所の電界と総電荷量が計算結果として得られる。従って、各点の電界のもっともらしさと雲内の電荷量のもっともらしさの両面から、自然雷雲と対比して検討を行なうことができる。

次に、後述する理由で、雷雲雲底と地表面との中間に第3の電荷群として正のイオン群を採用する場合があるが、これを含めた電荷配置図を図6に示す。

4. 模擬雷雲下の電界分布

以上に述べた条件の下で電界計算を行って、雷雲下の電界状態を以下の如くシミュレーション計算を行った。

夏季雷の条件としては、下層雷雲雲底の標高は種々の観測結果から 4 km 、上層雷雲の雲底標高は諸条件から 9 km とした。また、雲の大きさはそれぞれの雲によって色々であるが、三角測量法により、平均的に、底面の

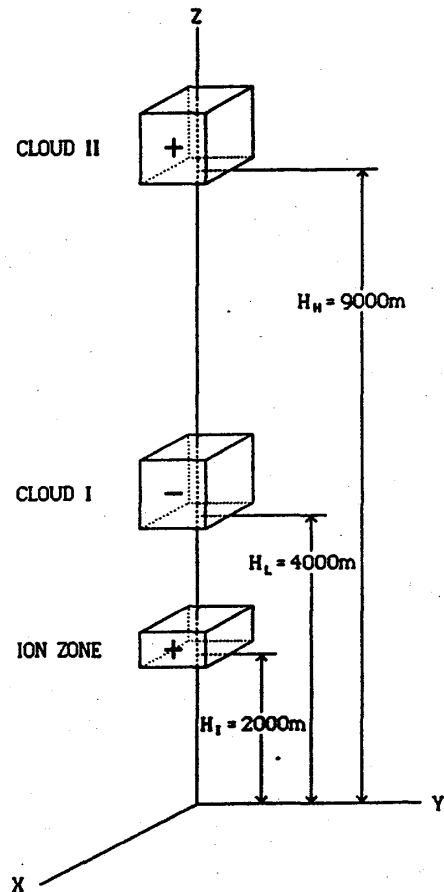


Fig.6 Arrangement of model thunderclouds with an ion zone. The image charges are omitted.

一辺が 1 km の正方形とした。

そして、下層、上層に分離配置した電荷群の各厚みは雲を観測しただけでは知ることが出来ないで、ここでは、どちらも 1 km とした。

このような夏季雷特有の条件を加味して、地上電界を $15\text{ kV/m} = 0.15\text{ kV/cm}$ として得られた計算結果では、下層雲底の付近の最大電界値は高々 5.1 kV/cm でしかない。なお、このときの正、負の各電荷量は 22.5 C であった。

一回の落雷に消費される電荷量は平均的に 20 C とされているので、電荷量の点からは矛盾は少ないが、電界値は余りにも小さい。則ち、2.として前述したように気圧、気温の条件によって、空気破壊電界は低下するものの 17.1 kV/cm 程度になることが望まれる。

模擬雷雲下の中心軸上の、各標高に於ける電界分布を図7に示す。なお同図には、第3の電荷群を下記のように設け、その結果得られる電界分布をも同時に示している。

則ち、上記のように、雷雲下空間に於ける最大電界の値が余りにも小さ過ぎるので、これを解消するために、雷雲下の適当な位置に、第3電荷群として、正のイオン群を配置して見た。これは、雷雲が接近するか、または

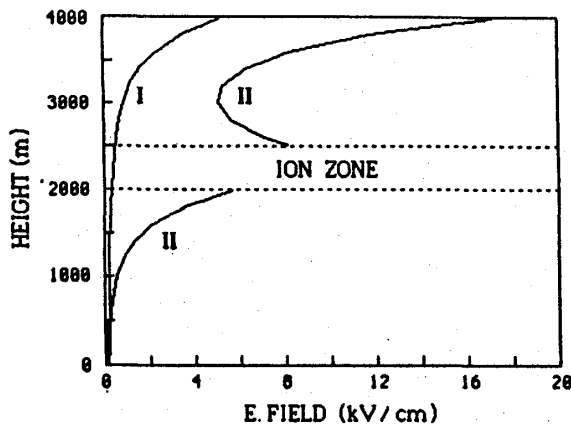


Fig.7 Magnitude of the electric field on the axis of symmetry (z-axis); summer season. Plots are for the case (I) without the ion zone, and (II) with the ion zone,

発達するにつれて、地表面付近の電界の高まりが生じ、先鋭な構造物などからのイオンの発生や自然に存在するイオンの電界方向への移動などにより、自然発生的に存在しているとの観測報告も見られるものである。

この第3の電荷群の位置と大きさ、および電荷量は、次のように決定した。

2. に前述したように、大気状態から、夏季雷雲の雲底の標高位置に当たる4 kmでは、 17.1 kV/cm の電界で空気は絶縁破壊が生じるので、この値と、地表面での落雷可能電界 15 kV/m とを設定し、雲底位置でこの値を得るには第3の電荷群はどのように配置すれば良いかを計算から得るようにした。この場合、このイオン群の容積は底面積を雲模擬の電荷群と同じに取り、厚みは 0.5 km とした。

この結果、イオン群の位置と電荷量はユニークソリューションの如く次のように定まった。

位置はイオン群の底面で、 2 km 、電荷量は 19.5 C と得られた。ただし、この電荷配置の基本的配置である雲模擬の電荷群の電荷量は、正、負それぞれ 74 C とかなり多くなった。しかし、このことは、1回の落雷で消費する電荷量 20 C 、また多重雷を考えると、大きな矛盾は無かろう。

このように取り扱えば、図7に示したような各標高に於ける電界分布となる。

なお、この場合、地表面に於ける水平方向の電界分布は図8に示すように、中心から 1 km 付近でへこみがあって、その内側では正の電界に、外側では負の電界になっている。

次に、冬季雷について同様なシミュレーションを行って、次のような結果を得た。

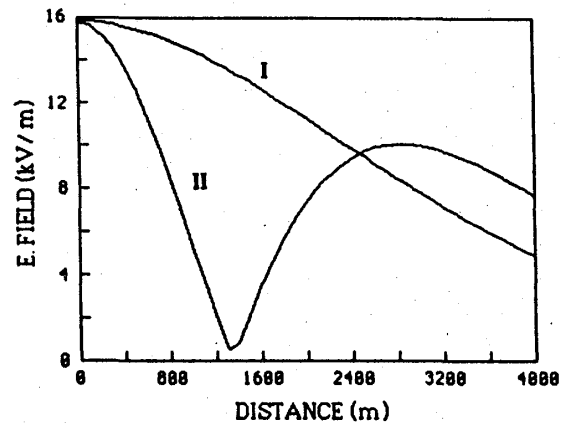


Fig.8 Magnitude of the electric field at sea level; summer season. Plots are for the case (I) without the ion zone, and (II) with the ion zone. The distance is measured from the axis of symmetry.

冬季雷の条件としては、下層雷雲の雲底標高は非常に低く 1 ないし 2 km 、上層雷雲の雲底標高は同様に 3 ないし 4 km とした。また、雲の大きさはそれぞれの雲によって色々であるが、気象衛星からの情報によると、底面の進行方向（この場合、 x 軸方向とする）の一边は 1 km 、他の一边は 10 km 以上に長く層をなしているの、ここでは、 3 km として計算している。

そして、下層、上層に分離配置した電荷群の各厚みについての観察データはないので、ここでは、どちらも 0.5 km とした。

ただし、標高高度によって、季節風の強度がかなり違う（「理科年表」によれば高度 2 km と 4 km とでは約 2 倍違う）と言うことがあるので、下層の負の電荷群と上層の正の電荷群の x 軸方向位置をずらす配置で計算も試みた。

このような冬季雷特有の条件を加味して、地上電界を 15 kV/m として得られた計算結果では、下層雷雲の雲底付近の最大電界は高々 $35.0 \text{ kV/m} = 0.35 \text{ kV/cm}$ でしかない。なお、このときの正、負の各電荷量も 2.8 C とかなり少ない。

一回の落雷に消費される電荷量は、冬季雷では少ないと言う報告もあるが、これではやはり電荷量が少ないと言う矛盾があろう。これにもまして、電界値は余りにも小さいと言う矛盾を感じる。則ち、2.として前述したように気圧、気温の条件によって空気破壊電界は低下し、標高 2 km では 21.3 kV/cm 、 1 km では 23.5 kV/cm 程度になることが望まれる。

模擬雷雲下の中心軸上の、各標高に於ける電界分布を図9に示す。なお同図には、夏季に設けたと同様な意味で、第3の電荷群を設け、その結果得られる電界分布を

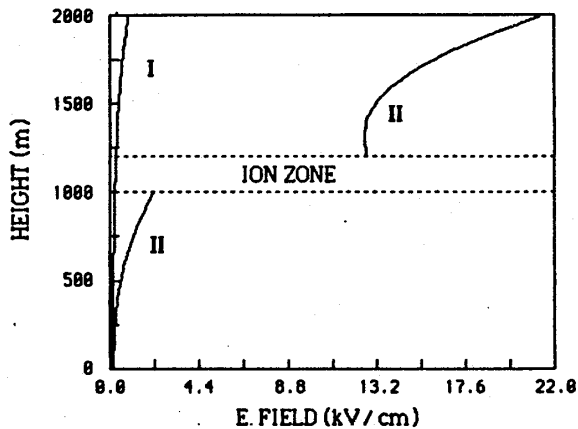


Fig.9 Magnitude of the electric field on the axis of symmetry (z-axis); winter season. Plots are for the case (I) without the ion zone, and (II) with the ion zone.

も示している。

則ち、上記のように、雷雲下空間に於ける最大電界の値が小さ過ぎるので、これを解消するために、雷雲下の適当な位置に、第3の電荷群として、正のイオン群を配置した。

この第3の電荷群の位置と大きさ、および電荷量は、次のように決定した。

2. に前述したように、大気状態から、冬季雷雲の雲底の標高位置を2 kmとした場合では、 21.3 kV/cm の電界で空気は絶縁破壊するので、この値と、地表面での落雷可能電界 15 kV/m とを設定し、雲底位置でこの値を得るには第3の電荷群はどのように配置すれば良いかを計算から得るようにした。この場合、このイオン群の容積は底面積を雲模擬の電荷群と同じに取り、厚みは 0.2 km とした。

この結果、イオン群の位置と電荷量はユニークソリューションの如く次のように定まった。

位置はイオン群の底面で、 1 km 、電荷量は 42.0 C と得られた。ただし、この電荷配置の基本的配置である雲模擬の電荷群の電荷量は、正、負それぞれ 165.6 C とかなり多くなった。このことは、1回の落雷で消費する電荷量 20 C 、また、多重雷を考へても矛盾を感じるが、細長く層をなしていることから考へてもまだ矛盾は残る。

このように取り扱えば、図9に示したような各標高に於ける電界分布となる。

なお、冬の場合に於ける地表面上での水平方向の電界分布は、イオン群のある場合と無い場合について、それぞれ図10の中に示した。夏季に比べて、中心軸からの距離が短い範囲で変化していると同時に、少し離れた位置でかなり高い電界を示すので、この点からも矛盾がある。

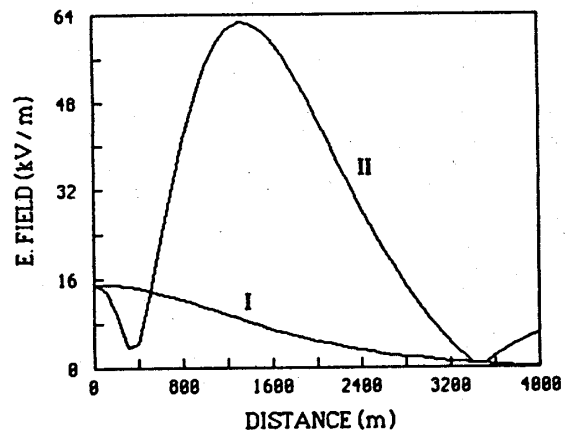


Fig.10 Magnitude of the electric field at sea level; winter season. Plots are for the case (I) without the ion zone, and (II) with the ion zone. The distance is measured from the axis of symmetry.

5. おわりに

本報告は、ここ数年、電気学会の年会や支部大会で講演文集に掲載して、発表してきたもの⁷⁾¹⁰⁾に、その後の新しいデータを加えてまとめたものである。

なお引き続き、詳しい計算手法並びに計算精度の検討について発表する予定である。

この考への下に、特に冬季においては、もう少し別な条件の場合に当てはめて計算すると同時に、第3のイオン群の存在など、実測を行って確認する必要が生じた。

なお、ここでは、大気破壊電界を空気状態の補正を行った値に合致するように、第3のイオン群を想定するなどして取り扱っているが、宇宙線などの別にトリガー要素を考慮するなら、今少し、低い電界を想定しても良いかも知れない。この点から、宇宙線の研究も見直しをしている。

本研究の一部は福山大学工学部電気工学科の卒業研究として、福島啓介、前田欣也、両君が参加している。また、東京大学宇宙線研究所の共同研究の援助を受けて行った。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) W.Gaskell, A.J.Illingworth, J.Latham, and C.B.Moore;「Ariborne studies of electric and charge and size of precipitation elements in thunderstormes」, Quart.J.R.Met.Soc., Vol. 104, pp 447-460, 1978
- 2) T.Takahashi;「Thunderstorm electrification—A numerical study」, J.Atmos.Sci., Vol.41, pp 2541-2558, 1984
- 3) M.Makino;「Numerical simuration of thunder-

storm cloud electrification], VII Int. Conf. on Atmos. Elect., American Meteo. Soc., Albany N.Y., Jun, 3-8, 1984

- 4) 桜野仁志, 日置功, 鬼頭幸生, 堀井憲爾; 「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, NO.8, pp 685-692, 1986
- 5) 河野俊彦, 山本修, 上之園親佐; 「円盤付き棒電極と模擬送電線を配置した場合のフラッシュオーバー特性」, 電気学会論文誌 B, Vol.106-B, NO.5, pp 435-442, 1986
- 6) 「理科年表」机上版-気象部一, 東京天文台, 1986
- 7) 河野俊彦; 「雷雲下の電界計算手法と結果の一例」, 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G4-2, 昭和60年
- 8) 河野俊彦, 今井光祐; 「雷雲下の電界計算による地上高と大気破壊電界の検討」, 電気関係学会中国支部連合大会講演論文集, p.32, 昭和62年
- 9) 河野俊彦, 今井光祐; 「電算機シミュレーションによる雷雲下の空間電界」, 電気関係学会中国支部連合大会講演論文集, p.33, 昭和62年
- 10) 河野俊彦, 今井光祐; 「電算機シミュレーションによる冬季雷雲下の空間電界」, 電気学会全国大会講演論文集, 昭和63年(発表予定)