

雷雲内における空気破壊電界について

今井 光祐*・河野 俊彦*

On the Breakdown Electric Field in a Thundercloud

Mitsuhiro IMAI and Toshihiko KOUNO

ABSTRACT

An estimation of the breakdown electric field in a thundercloud is derived from the condition for a self sustaining discharge to occur. This new estimation is considered as an extension of the one that has been adopted to study the electrical structure of a thundercloud by authors, and gives about 10% lower value at the altitude where lightning discharges start to the ground.

キーワード：雷、雷放電、空気破壊電界、空間電荷

1. まえがき

社会の情報化に伴い、基幹エネルギー源である電力送電線への落雷や、雷に伴う電磁波ノイズによる電子機器への障害など、雷がもたらす影響の度合いはますます大きくなってきている。著者らは、雷への物理的な興味と共に、このような社会的影響を考慮して、雷雲に関する研究に着手した。

すでに、計算機を用いた雷雲の研究として、雷雲のシミュレーションがなされている¹⁻³⁾。しかし、実際の雷雲に比べれば、非常に単純化したモデルであり、雷雲の全体を模擬したと言えるものは少ない。このような研究の多くは、雷雲内における電荷の生成機構の研究を目的としていて、どういった生成機構が雷放電を持たらすほどの多量の電荷を生成することができるかということに焦点があり、雷雲内の大域的な電荷分布についての議論は2次的なものとなっている。しかし、雷雲内の電荷分布、および、雷雲電荷が作る電界を知ることは、落雷予測等に関連して、非常に重要な研究テーマである。

著者らは、まず、手始めとして、落雷直前の雷雲に焦点を絞り、数値計算を用いて、電界という面から、その電氣的構造を調べてきた^{4,5)}。その際、電荷分布を推定す

るために、次のような発見的な方法を用いた。

- 1) まず、適当と考えられる帯電領域、地表への放電開始点を設定して、地表電界が最大（あるいは、最小）となる地点を推定する。
- 2) 次に、放電開始点において空気破壊電界が作られ、同時に、地表電界が最大（あるいは、最小）となる地点において、ロケット誘雷観測による推定値⁶⁾ +16kV/m（あるいは、-16kV/m）となるように各領域内の電荷密度を計算する。
- 3) そして、地表電界などの電界を計算し、その結果を検討して、最適と考えられる空間電荷分布を模索する。

ここで、鍵となるのは、電荷密度を計算する際に、条件として用いられる空気破壊電界強度の値である。この値によっては、推定される電荷分布が大きく変わってしまう可能性がある。

通常、地表における空気破壊実験では、空気破壊電界強度を標準空気におけるものに補正して議論される。これまで、雷雲内における空気破壊電界強度の見積りには、この補正を逆に用いることにして、第一近似として、「空気破壊電界強度は、空気密度に比例する」としてきた。

しかし、地表への放電が開始すると考えられる高度における気圧は、地表における気圧の約1/2となるため、もう少し、見積り精度を上げる必要があると思われる。

そこで、本論文では、空気破壊電界の圧力依存性（すなわち、密度依存性）を、タウンゼントの火花条件と空気の見かけの電離係数の実験値から求め、空気破壊電界の高度依存性について検討することにする。

2. 空気破壊電界の圧力依存性

落雷が発生するためには、雷雲内のどこかで放電が開始することが必要である。雷雲と地表を無限に広い極板と考え、その間に一樣な電界が作られていると考えることは、雲底が極端に低い場合を除くと、非現実的である。しかし、雷雲内での空気破壊に関する明確な理論は、今のところ、存在していない。そこで、雷雲内での空気破壊電界強度を一樣な電界中における破壊電界強度で見積もることとする。

タウンゼントは、直流電圧を印加した、平行平板間における放電について考察し、放電が持続するための条件（タウンゼントの火花条件と呼ばれている）を次のように求めている⁷⁾。

$$1 - \gamma [\exp(\alpha d) - 1] = 0. \quad (1)$$

ここで、 α は電子の衝突電離係数、 γ は1個の正電荷が陰極から2次電子を叩き出す確率、 d は極板間の距離である。さて、空間電荷密度が小さく、これによる電界が外部電界 E に比べて小さい場合、電子が平均自由行程 λ だけ進む間に引き起こす衝突電離数 $\alpha\lambda$ は、その間に得たエネルギー $E\lambda$ によって決まる。また、平均自由行程 λ は、圧力 p の逆数に比例するので、 α と E の間には、一般に、次のような関係がなりたつ。

$$\frac{\alpha}{p} = F \left(\frac{E}{p} \right) \quad (2)$$

実験的には、大気圧付近の火花破壊電界程度の E に対して、 α/p と E/p の関係は、次のような2次式で十分近似されることが知られている⁸⁾。

$$\frac{\alpha}{p} = A \left(\frac{E}{p} - B \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 A と B を気体によって定まる定数である。

この実験式とタウンゼントの火花条件(1)式を組み合わせれば、空気破壊電界が求められる。しかし、タウンゼント理論における α は、1個の電子が気体中を単位長だけ進む間の実質的な電子数の増加率と理解すべきであり、もし、気体が、電子付着性を持つならば、付着率 η を差し引いた見かけの電離係数 $\alpha' = \alpha - \eta$ を用いなければならない。空気は、電子付着性を持つので、ここでは、見かけの電離係数を次のような2次式で近似することにする。

$$\frac{\alpha'}{p} = A \left(\frac{E}{p} \right)^2 + B \left(\frac{E}{p} \right) + C \quad (4)$$

また、定数 A, B, C の値は、電界と見かけの電離係数との関係についての実験値⁸⁾を用いて、相対誤差の2乗和が最小となるように決定することにする。

見かけの電離係数 α' と(1)式の α を同一視すると、空気破壊電界 E_B は、 a, b, c を定数として、次のように表される。

$$\begin{aligned} E_B &= p \left(a + \sqrt{b - \frac{c}{p} \alpha'} \right) \\ &= p \left(a + \sqrt{b - \frac{c}{pd} \log \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

表1に、上に述べたような方法で求めた定数 A, B, C と a, b, c の値を示しておく。

さらに、具体的な空気破壊電界を得るためには、電極間の距離 d と2次電子の放出確率 γ を知る必要がある。しかし、雷雲内での放電開始のメカニズムについては、まだ、未知の部分が多く、共通の理解は得られていない。したがって、 d や γ について、これといった値を特定することは不可能である。しかし、次のように考えることができる。(5)式を導くもとになった(4)式は、単に、見かけの電離係数 α' と電界 E の関係について述べているだけで、空気破壊については、何も述べていない。タウンゼントの理論と組み合わせることによって、すなわち、(5)式の形に表すことによって、見かけの電離係数 α' と空気破壊電界 E_B との間に特別な関係が与えられる。このように考え

表1 定数 A, B, C と a, b, c の値
それぞれの値は、圧力 p をTorr、電界 E をV/mで表した場合の数値である。

$A = 8.30E-5$	$B = -4.23E-3$	$C = 5.08E-2$
$a = 2.55E1$	$b = 3.69E1$	$c = 1.21E4$

表2 空気破壊が起きるときの見かけの電離係数 α' の値

空気破壊電界 E_B	見かけの電離係数 α'
2500 kV/m	1.14 m^{-1}
2750 kV/m	4.90 m^{-1}
3000 kV/m	10.0 m^{-1}

ると、電極間の距離 d や2次電子の放出確率 γ を知らなくても、次のようにして、空気破壊が起きるときの電離係数 α' ($=\log(1+1/\gamma)/d$) を決定することができる。すなわち、標準空気 (15°C、1気圧の空気) に対して、(5)式が空気破壊電界の代表値を与えるように、電離係数 α' の値を決定すればよい。

極板間の距離が1cm程度以上の場合、標準空気に対する空気破壊電界の代表値は、おおよそ、2500kV/m～3000kV/mとされている⁹⁾。空気破壊電界の代表値を2500kV/m、2750kV/m、3000kV/mとしたときの見かけの電離係数 α' の値を表2に示しておく。

さて、(5)式から、圧力 p が高い場合には、根号内の p^{-1} を含む項を無視することができて、空気破壊電界は圧力 p に(したがって、密度に)比例すると見なしてよいことが分かる。すなわち、これまで用いてきた空気破壊電界に関する仮定に一致する。したがって、(5)式は、その拡張となっている。

3. 雷雲内電荷分布の推定への適用

(5)式で与えられる空気破壊電界を雷雲内での放電開始に適用するためには、空気破壊電界強度を高度 z の関数として表しておく都合がよい。よく知られているように、気体の圧力 p の高度依存性は次のような式で決定される。

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho = -\frac{gp}{RT} \quad (6)$$

ここで、 g は重力加速度、 R は気体定数、 T は気体の絶対温度である。温度 T の高度依存性は、高度 z とともに、一定の割合 Γ_0 で減少すると仮定する。

$$T(z) = T_0 - \Gamma_0 z \quad (7)$$

ここで、 T_0 は、地表における気体温度であり、断熱減率 (lapse rate) と呼ばれる気温の減少率 Γ_0 は、通常、6.5K/kmとされている¹⁰⁾。このように仮定し、 p_0 を地表における気体の圧力とすると、圧力 p は高度 z の関数とし

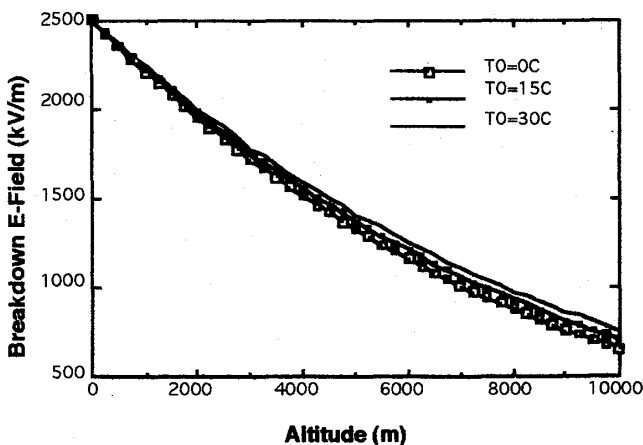


図1 空気破壊電界の高度依存性

地表における圧力 p_0 を760 Torrとし、地表における気温 T_0 を0°C、15°C、30°Cとした場合

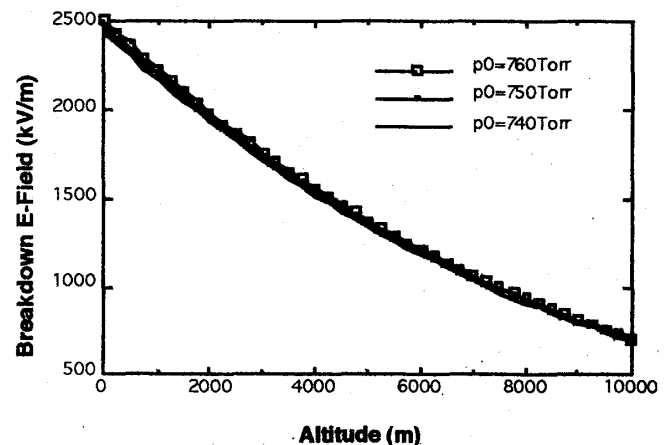


図2 空気破壊電界の高度依存性

地表における気温 T_0 を15°Cとし、地表における圧力 p_0 を740 Torr、750 Torr、760 Torr、とした場合

て次のように表される。

$$p = p_0 \left(1 + \frac{\Gamma_0}{T_0} z\right)^{-g/RT_0} \quad (8)$$

(5) 式、(8)式を用いて、空気破壊電界 E_B の高度依存性をグラフに表すと、図1、図2のようになる。図1は、 p_0 を760Torrに固定して、 T_0 を 0°C 、 15°C 、 30°C にとった場合であり、図2は、 T_0 を 15°C に固定して、 p_0 を760Torr、750Torr、740Torrにとった場合のグラフである。空気破壊電界 E_B は、高度とともに減少することが分かる。 T_0 が

低いほど、また、 p_0 が低いほど、わずかであるが、空気破壊電界 E_B は低い。 $p_0=760\text{Torr}$ 、 $T_0=15^\circ\text{C}$ の場合を基準にすると、高度5000mにおいても、その差は $\pm 3\%$ 程度であり、放電の開始には確率的な要素も含まれることを考慮すれば、ほとんど、誤差の範囲と考えられる。また、減少の割合は、それほど、急激な減少とは言えず、落雷にいたる放電が開始すると考えられる高度4000m付近においても、1500kV/m程度である。

このような高度依存性は、空気破壊電界を空気密度に比例するとした場合⁴⁾のものに一致している。定量的には、

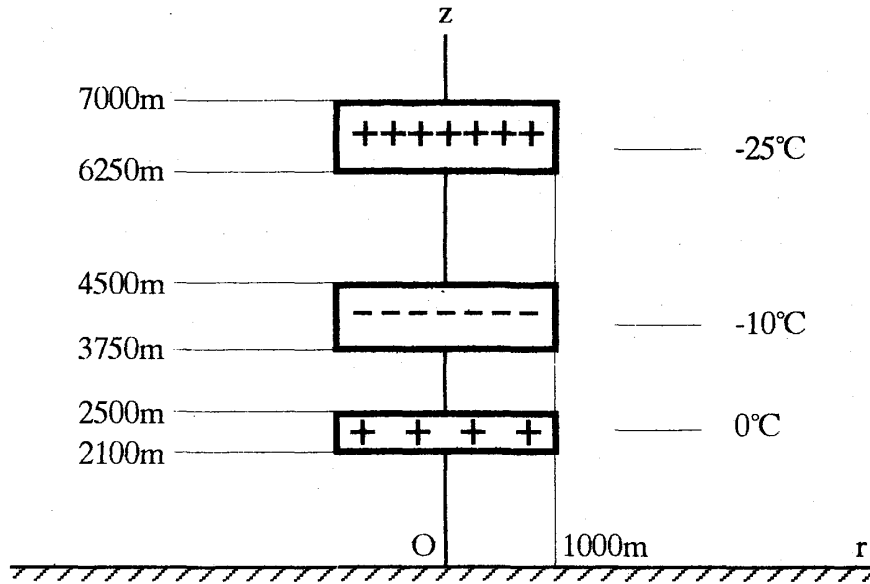


図3 推定される標準大気内の3極子構造セル

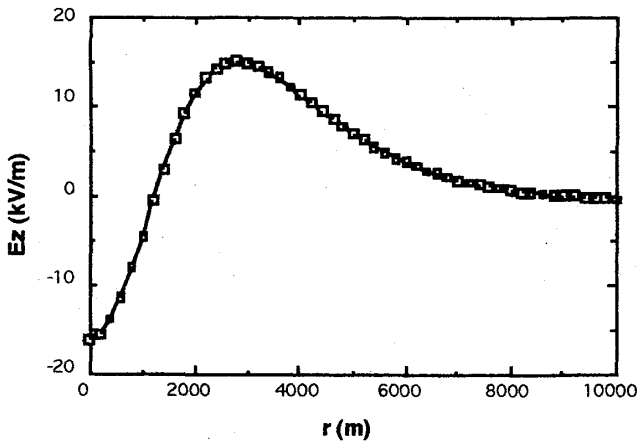


図4 3極子構造セルが作る地表電界

横軸は、セル中心軸からの距離、縦軸は、地表電界である。地表電界は $\pm 16\text{ kV/m}$ の範囲内にある。

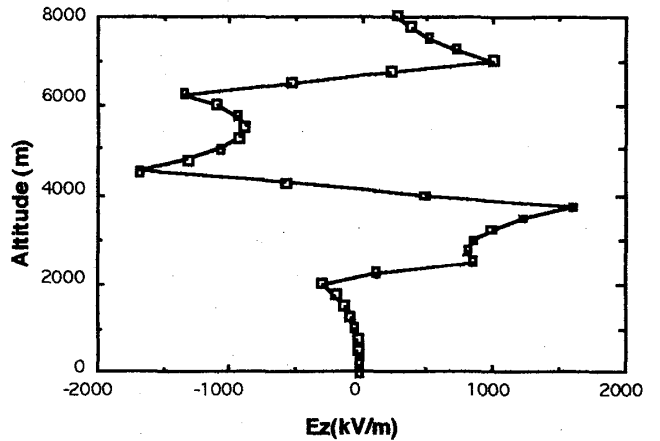


図5 3極子構造セルが作るセル中心軸上の電界

縦軸は高度、横軸は電界である。負電荷領域の下面(高度3750m)において、空気破壊電界に達している。

(5)式の根号内の p^{-1} に依存する項の効果によって、高度4000m付近では、空気密度に比例するとした場合より、空気破壊電界は10%程度低い値となっている。

(5)式、(8)式によって与えられる空気破壊電界を用いて、第1節で述べた方法に従って、雷雲内の電荷分布を推定することができる。ここでは、標準大気内の雷雲セルについて、その電荷分布を推定した結果を図3～図5に示しておく。空気破壊電界が低い値となっているので、以前の結果⁵⁾とはわずかに異なるが、定性的には、変わらないと言える。このように、(5)式、(8)式を用いた場合と空気密度に比例するとした場合の空気破壊電界は、定性的には、同じ高度依存性を持つので、これまで得られた雷雲の電氣的構造に関する定性的な結果は、全く変更する必要はない。

4. まとめ

本論文では、雷雲内における放電開始に適用するために、タウンゼントの火花条件と空気の見かけの電離係数の実験値、および、圧力の高度依存性を用いて、空気破壊電界の高度依存性を求めた。その結果、これまで用いてきたものより、よい近似値が得られ、落雷にいたる放電が開始すると考えられる高度付近では、空気破壊電界は、これまで用いてきた値に比べて、10%程度低いことがわかった。したがって、定量的な議論をする際には、本論文で得られた空気破壊電界を用いる必要がある。

しかし、雷雲の電氣的構造は、一般に、3層構造をしていること、また、特に、冬季雷雲では、地表構造物から放出されるイオンが重要な役割をすることなど、雷雲の電氣的構造に関して、これまで得られた定性的な結果については、全く同様に導くことができる。

参考文献

- 1) Chiu, C. S.: J. Geophys. Res., **83**, 5025-5049 (1978)
- 2) Tzur, I. and Z. Levin: J. Atmos. Sci., **38**, 2444-2461 (1981)
- 3) Takahashi, T.: J. Atmos. Sci., **41**, 2541-2558 (1984)
- 4) 河野・今井: Res. Lett. Atmos. Electr., **8**, 91-97 (1988)
- 5) 今井・河野: Res. Lett. Atmos. Electr., **11**, 1-10 (1991)
- 6) 櫻野 他: 電気学会論文誌 B, **106**, 685-692 (1986)
- 7) 電気学会編集: 高電圧工学, p.20, 電気学会 (1981)
- 8) 電気学会編集: 放電ハンドブック, p.24, 電気学会 (1975)
- 9) 電気学会編集: 高電圧工学, p.29, 電気学会 (1981)
- 10) 小倉 義光: 一般気象学, p.51, 東京大学出版会 (1984)