

線電荷群で模擬した帯電粒子雲による接地地球電極表面の電界の強さと放電開始条件

東山 禎夫^{*,1}, 遠藤 正章^{*}, 杉本 俊之^{*}

(2015年9月24日受付; 2015年12月26日受理)

Electric Field Strength at the Surface of a Grounded Sphere Electrode by a Charged Particle Cloud Simulated by Line Charges and Condition for Discharge Inception

Yoshio HIGASHIYAMA^{*,1}, Masaaki ENDO^{*} and Toshiyuki SUGIMOTO^{*}

(Received September 24, 2015; Accepted December 26, 2015)

The potential distribution around a large scale space charge cloud and the electric field strength at a grounded sphere electrode located nearby it was calculated by a charge simulation method. A model of the charged particle cloud was constructed based on the experimental data on formation of a charged cloud. The space charge of the cloud was simulated by line charges with a charge density of around $8 \mu\text{C}/\text{m}$ estimated from a discharge current. The potential in the center of the cloud reached at 350 kV for a charged cloud with 4 m long and 1 m diameter. Although the electric field strength at the surface of a grounded sphere electrode with a smaller diameter becomes higher for the same charged cloud, under the condition when a brush corona discharge was observed, the electric field strength was almost the same value regardless of diameter and location of a sphere electrode. Furthermore, the ionization distance obtained by calculation for onset of corona discharge was consistent with a length of a stem of brush corona discharge extending from the grounded electrode.

1. はじめに

粉体の空気搬送では、粉体の帯電によるつまりや空間電荷雲からの放電、粉体の堆積による放電に起因する火災や爆発等の災障害が起きる^{1,3)}。さらに、雷雲や荷電粉体のような空間電荷雲からの放電現象は金属電極からの放電と異なり、電荷雲内の電荷分布や形状が時間的に変化し、電位が定まらないことから放電の発生を予測することが難しい。粉体の搬送など空間電荷雲が不可避免的に形成される場では、除電や電位を監視する⁴⁾だけでなく、放電による災障害発生を予測することが重要であり、シミュレーションによる放電開始条件の検討が行われている⁵⁾。

一方、電荷雲からの放電現象を調査するために、帯電水滴^{6,7)}や帯電粒子雲^{8,9)}を用いて空間電荷雲を人工的に形成し、研究も行われている。筆者らはコロナ放電で帯電した粒子による空間電荷雲から放電を起こして放電回路の発光様相¹⁰⁾や放電電流や電荷量¹¹⁾などの電気的特性を明らかにしてきた。

本研究では、負極性の空間電荷雲と接地電極との間で

放電が起きるときの条件を把握することを目的として、実験的に形成した帯電粒子雲と接地地球電極の間で放電を発生させ、放電電荷量から雲内の電荷密度を推定し、電荷重畳法により帯電粒子雲周囲の電位および接地地球電極近傍の電界の強さを求めた。さらに、接地電極から電荷雲に向かう電界の強さの分布から放電開始条件を検討し、モデルの妥当性を確認した。

2. 帯電粒子雲の形成とモデル

2.1 帯電粒子雲の形成

帯電粒子雲生成装置は高圧ファン、粉体供給装置、コロナ帯電装置および噴出口からなる⁹⁾。大型の電荷雲を形成するために、1台の高圧ファンからの気流を3つに分岐し、3台のコロナ帯電装置の直前で粉体を供給して、帯電粉体を噴出させた。コロナ帯電装置は直径100 mmの接地円筒電極の中心部に直径0.1 mmのタングステン線を張ったもので、線電極への印加電圧を-16, -19および-25 kVと変えて負極性の帯電粒子による電荷雲の電荷量や分布を変化させることができる。帯電させる粉体は250 μm 以下にふるいわけした土壌改良剤で炭酸カルシウム98.3%を主成分とする帆立貝の殻を焼成したものである。質量分布はそれぞれ53 μm 以下、53-75, 75-106, 150-212および212-252 μm に対し、それぞれ、11, 17, 15, 20, 25および12%である。粉体の見かけの導電率は $10^{12} \Omega\cdot\text{m}$ 、比誘電率は3である。噴出口の気流の速度を30

キーワード：帯電粒子、空間電荷雲、電荷重畳法、電界の強さ、放電開始条件

* 山形大学大学院理工学研究科

(〒992-8510 山形県米沢市城南4-3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 3-4-16, Jonan Yonezawa, 992-8510, Japan

¹ higashi@yz.yamagata-u.ac.jp

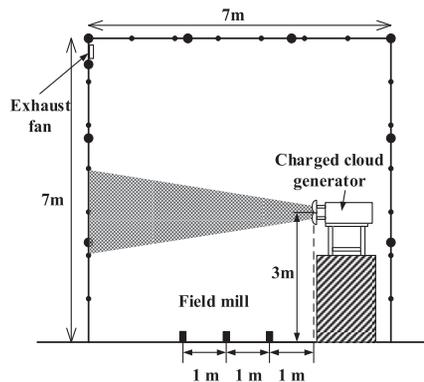


図1 帯電粒子雲生成装置と電界計の配置
Fig. 1 Location of a charged cloud generator and field mills.

m/sに設定した状態で、粉体供給口から20 g/sで供給した。

図1に示すような一辺が7mの立方体閉空間内の地上3mに高さから3台のコロナ帯電装置に粉体を約5秒間供給し、水平方向に帯電粒子雲を形成した。電荷雲による地表の電界を測定するために、電界計を噴出口から1m、2mおよび3m前方の位置にさらに、帯電粒子雲からできるだけ大きな放電を起こすために、噴出口の1m前方に、直径65mmあるいは100mmの接地電極を粒子雲中心から距離0.5~1m離して固定した。

帯電粒子雲を噴出している5秒間の地上電界の強さの時間変化を図2に示す。噴出開始から5秒経過したときの電界の強さは、3mの位置で最大95 kV/mに達している。

噴出口が1台の時の噴出口から1mの位置で電荷雲内の異なる位置で帯電粒子を吸引型ファラデーケージで回収し、比電荷の大きさから半径方向の電荷密度を求めた。図3に示すように、コロナ帯電電圧が大きくなるほど、帯電粒子の電荷量が大きくなり、静電反発力で電荷雲内での外側の電荷量が大きくなる。

直径100mmの球電極から起きた放電の一例を図4に示す。電荷雲に向かって枝分かれした放電路が形成され、球電極表面から比較的明るい長さ数cmの放電路が出て、その先から電荷雲に向かって枝分かれしたブラシ状の

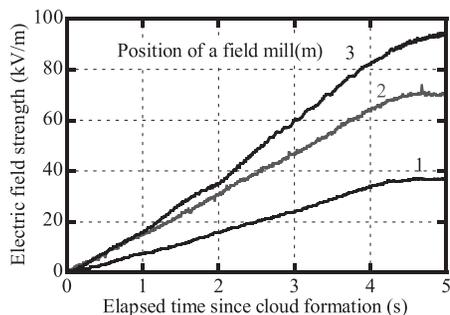


図2 帯電粒子噴出後による地上電界強度の時間変化
Fig. 2 Time variation of the electric field strength at the ground by formation of a charged particle cloud.

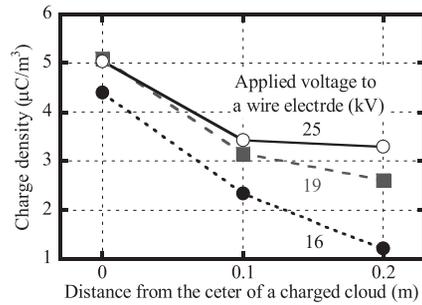


図3 帯電電荷雲内の空間電荷密度
Fig. 3 Space charge density in a charged particle cloud.

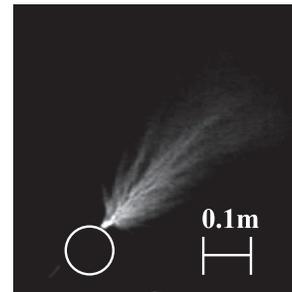


図4 接地電極から電荷雲に向かう放電
Fig. 4 Discharge channel extending from a sphere electrode toward a charged particle cloud.

放電路が伸びている。以下では、このような放電が起きる直前の電極先端の静電界の強さを求めるとともに、放電開始条件を確認する。

2.2 電荷雲の計算モデルと仮想電荷の配置

帯電粒子で形成された電荷雲を模擬した3次元電界計算モデルを図5に示す。3台の帯電装置から噴出される帯電粒子雲の幅は1m前方での直径1mまで広がるので、電荷雲のモデル形状として直径1mの円柱とした。さらに、帯電粒子を噴出後、1秒経過する間にほぼ等速で4m前方まで到達しているため、電荷雲の先端は速度4m/sで移動するものとして、放電が最初に起きたときの帯電粒子雲の長さを決めた。

帯電粒子による電荷雲周囲および地上から突き出した接地電極先端の電界を求めるために電荷重量法を用いた。電荷雲を線電荷群 Q_s で模擬し、接地電極の形状と電位を模擬するための n 個の仮想電荷群 Q_i を未知数とする多元連立方程式(1)を解くことにより、仮想電荷量を決定する。得られた仮想電荷と設定した空間電荷の値から、任意の位置の電位と電界を計算できる¹²⁾。

$$[P_i][Q_i] + [P_s][Q_s] = [V] \quad (1)$$

ただし、 $[P_i]$ は仮想電荷による電位係数、 $[Q_i]$ は仮想電荷量、 $[P_s]$ は空間電荷による電位係数、 $[Q_s]$ は電荷雲内に配置した空間電荷、 $[V]$ は電極電位のマトリクスを表している。

球電極を模擬するために配置した仮想電荷、輪郭点お

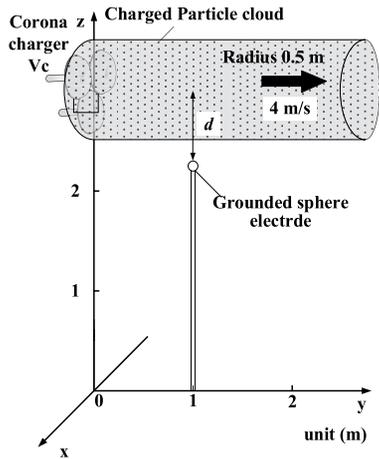


図5 移動する帯電粒子雲のモデル
Fig. 5 Model for a moving charged particle cloud.

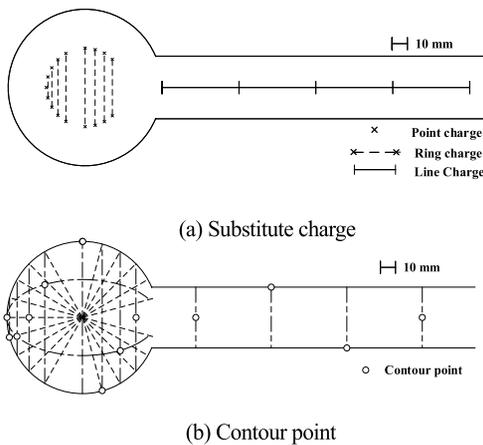


図6 接地球電極の仮想電荷および輪郭点の配置
Fig. 6 Arrangement of substitute charges and contour points.

および検査点の位置を図6に示す。接地球電極表面の電位を0Vに保つように、球電極内部に1個の点電荷と8個のリング電荷、支持部中央には長さ50mmの線電荷を直線状に配置した。

さらに、帯電粒子雲が球電極に対して非対称となることを考慮して、球および支持部の電極表面全体に輪郭点を配置した。いずれの電荷も接地面に対する鏡像電荷を配置している。

2.3 帯電粒子雲モデルの電荷量の推定

粉体をコロナ帯電させるために線電極に印加する電圧を高くすると、粉体の帯電電荷量が大きくなり、より大きく帯電した粉体は帯電粒子雲内の周辺部に静電反発力を受けて広がる。帯電粒子雲を線電荷で模擬するためには、帯電条件に応じて電荷雲内の線電荷の数と密度を変える必要がある。

3台の帯電粒子噴出装置によって形成される電荷雲内の電荷密度は、図3に示す噴出装置1台の電荷密度を3倍し、印加電圧ごとに各領域に配置する線電荷の数と電荷密度

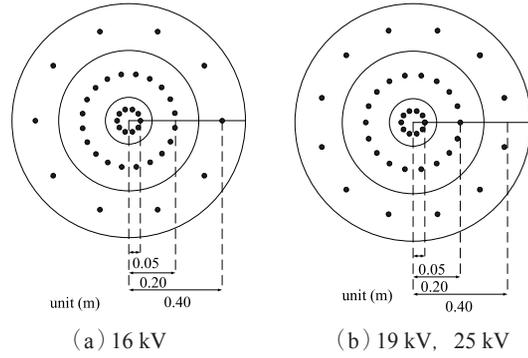


図7 帯電粒子雲を模擬する仮想線電荷の配置(断面)
Fig. 7 Arrangement of line charge simulating a charged particle cloud (cross section).

表1 実験的に得られた放電電荷量から求めた空間電荷密度
Table 1 Space charge density estimated from charge quantity of discharge current obtained experimentally.

Corona charging voltage (kV)	Minimum charge quantity (μC)	Extension of discharge channel (m)	Space charge density ($\mu\text{C}/\text{m}^3$)	Charge density of a cloud ($\mu\text{C}/\text{m}$)
16	1.30	0.34	9.5	7.5
19	1.35	0.33	10.2	8.0
25	1.26	0.29	10.8	8.5

を設定した。図7に示すように、帯電粒子雲の中心部および中心から半径0.2mおよび0.4mの位置に線電荷を配置した。帯電粒子雲を模擬するために線電荷の1本当たりの電荷密度を粒子雲中心から半径0.1mの円柱領域と0.1~0.3mおよび0.3~0.5mの二つの円筒領域に分けた。

帯電粒子雲と直径100mmの接地電極との距離を0.7m、コロナ帯電装置への負極性印加電圧を16, 19および25kVとしたとき、最小の放電電荷量は表1に示すように、それぞれ1.30, 1.35および1.26 μC であり、放電光の広がり幅は0.34, 0.33および0.29mであった。この放電の広がり幅にわたって帯電粒子雲の中心までの帯電粒子が中和されたとすると、空間電荷密度はそれぞれ9.5, 10.2および10.8 $\mu\text{C}/\text{m}^3$ となり、電荷雲全体の単位長さ当たりの電荷密度はそれぞれ7.5, 8.0および8.5 $\mu\text{C}/\text{m}$ と求められる。

各領域の線電荷の数は、比電荷量を実験的に測定したときに捕捉された粉体の質量の割合で配分した。帯電粒子雲の中心から0.05, 0.2および0.4mに配置した線電荷の数は、印加電圧16kVのときにはそれぞれ10, 20および10本であり、印加電圧が19および25kVのときは外周部の電荷量を大きく設定するために、それぞれ10, 18および12本とした。

3. 計算結果および検討

3.1 電荷雲周囲の電位分布

電荷密度8.5 $\mu\text{C}/\text{m}$ 、全長4mの帯電粒子雲の中心から

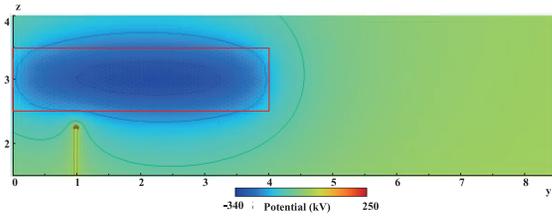


図8 接地電極を配置した4 m 長の電荷雲による電位分布
Fig. 8 Potential distribution around a 4 m-long charged particle cloud with a 100 mm-diameter sphere electrode.

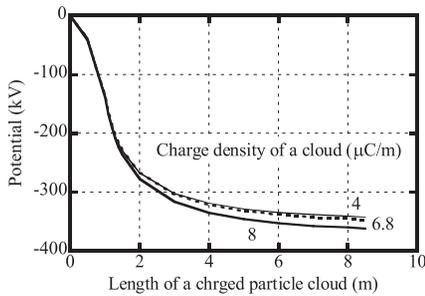


図9 帯電粒子雲の長さを変えたときの中心の電位
Fig. 9 Potential at the center of charged particle clouds.

0.7 m 離れた位置に直径 100 mm の接地電極を配置したときの帯電粒子雲の電位分布を図8に示す。帯電粒子雲内の最大電位はそれぞれ -175, -281 および -326 kV である。

帯電粒子雲の長さを変化させていったときの帯電装置の1 m 前方における帯電粒子雲中心の電位を図9に示す。帯電粒子雲が2 m に到達するまで、噴出口から1 m 前方での電位は大きく上昇するが、帯電粒子雲が3 m を超えると、電荷雲の殆どは遠ざかるため中心の電位にはあまり影響しない。帯電粒子雲の単位長当たりの電荷密度を大きくしても中心電位は大きく変化しない。8 m 長の電荷雲では350 kV に達する。

3.2 接地電極近傍の電界の強さ

帯電粒子雲の長さを4 m とし、中心から0.7 m の位置に直径100 mm の接地電極をおいたときの、接地電極表面の電界の強さの分布を図10に示す。電界の強さは電荷雲に対向する90°の位置で最も高くなり、±15°の範囲で比較的高い値を維持している。電荷雲の長さが同じときの最大電界の値はコロナ帯電電圧が16, 19, および25 kV の条件に対応して、電荷密度が大きくなるとそれぞれ、35.9, 38.4 および40.8 kV/cm と大きくなる。

電界の強さの最大となる位置から帯電粒子雲までの間の電界の強さの分布を図11に示す。図中Z座標2.3 m が電極表面であり、3 m は電荷雲中心の位置である。接地電極表面から離れるにつれて、電界の強さは急激に減少している。距離2.8 m および2.95 m 付近で電界が乱れているのは、電荷雲を模擬した線電荷までの距離が近づくための影響である。

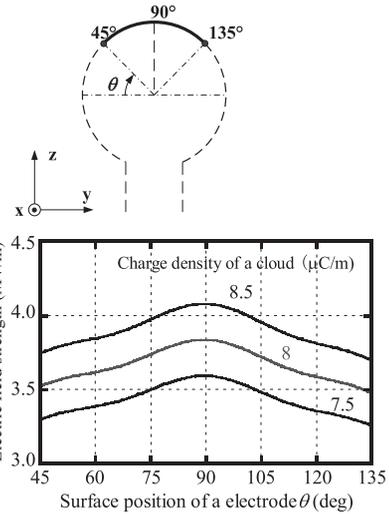


図10 4 m 長電荷雲による100 mm 径球表面の電界の強さ
Fig. 10 Electric field strength at the surface of sphere electrode with 100 mm diameter by 4 m-long charged clouds.

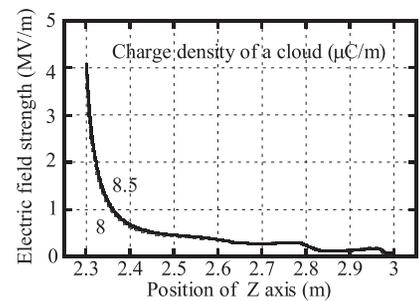


図11 球電極表面から4 m 長電荷雲に向かう電界の強さ
Fig.11 Distribution of the electric field strength from a sphere electrode to the center of charged clouds.

3.3 接地電極からの放電時の電界の強さ

3.3.1 実験における電荷雲と接地電極間の放電特性

実際の実験においては、コロナ帯電電圧が大きくなると電荷雲の電荷密度が大きくなるため、電極から放電が最初に発生するときの時間が早くなる。

帯電粒子雲と接地電極との距離、接地電極の径を変えたときの放電回数および放電間隔を表2に示す。帯電粒子雲と接地電極間の距離が0.7 m のとき、印加電圧が16,

表2 帯電粒子雲近傍の球電極からの放電発生様相
Table 2 Occurrence aspect of electrical discharge extending from a sphere electrode located near a charged cloud.

Diameter of sphere electrode (mm)	Electrode Position (m)	Charging voltage (kV)	Number of discharges	Period between discharges (ms)	Time to discharge inception (s)
100	0.7	16	11	303 ± 82	2.17
	0.5	19	54	96 ± 14	0.4
	0.7	19	35	194 ± 45	0.97
	1.0	19	3	917 ± 106	2.53
	0.7	25	32	151 ± 22	0.9
62	0.7	19	78	68 ± 26	0.43

19 および 25 kV のときの最初に放電が起きるのは帯電粒子を噴出してから約 2.2, 1.0 および 0.9 s 経過した後である。この時間が経過したとき、速度 4 m/s で移動する帯電粒子雲の長さは 8.5, 4.0 および 3.6 m となる。接地電極付近の電界の強さが放電の発生に十分な値になるまで、粒子雲が大きくなる必要があることを示している。

コロナ帯電電圧が異なると電荷雲の電荷密度が異なるので、接地電極から最初に放電が発生する 8.5 m, 4 m, および 3.6 m の長さの電荷雲にそれぞれ、表 1 の 7.5, 8.0, 8.5 $\mu\text{C}/\text{m}$ の電荷密度を用いて接地球の表面電界を求めた。放電が起きるときの最大の電界の強さはそれぞれ 3.97, 3.84 および 3.97 MV/m となり、ほぼ同じ値となった。

一方、表 2 の 19kV に対する特性を比較すると、同じ電荷密度の電荷雲でも接地電極の位置が 0.5, 0.7, および 1 m 電荷雲から離れるにつれて、放電回数 54, 35, および 9 回と少なくなり、結果として放電間隔が長くなる。さらに、接地球電極の径を 62 mm に小さくした場合、放電回数は 78 回と多くなり、放電間隔は短くなった。径が小さいときには電極先端の電界が強くなるため、電荷雲内の電荷量が少なくても電極先端の電界が放電の発生に必要な大きさに達することを示している。

3.3.2 放電発生時の接地電極近傍の電界分布

接地球電極の位置が異なるときの電極先端から放電が最初に発生するまでの時間が異なるので、電極径に応じて電荷雲の長さを設定し、電極表面から電荷雲中心までの電界を求めたものが図 12 である。球表面における最大電界は帯電粒子雲と電極間距離 d が 0.5 および 0.7 m のときは比較的近い値となったが、1 m のとき、電界は弱くなった。

球電極の直径も放電の発生に大きく影響する。帯電装置の印加電圧 19kV の条件で電荷密度を 8 $\mu\text{C}/\text{m}$ に設定し、4 m 長の帯電粒子雲の中心から 0.7 m の位置に置いた接地球電極表面の電界の強さを図 13 に示す。直径 62 mm の球電極では電界の強さが 5.5 MV/m を超え、放電開始には十分な高い値になっている。この電極から最初に放電が起きると

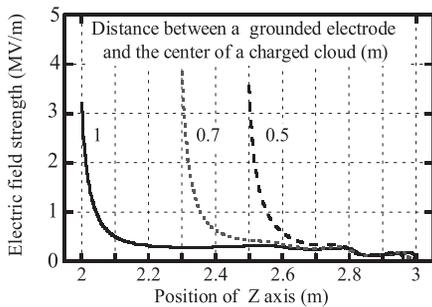


図 12 放電が開始したときの電荷雲による 100 mm 径の球電極表面から電荷雲中心までの電界分布
Fig. 12 The electric field strength from the surface of a 100-mm dia. sphere electrode to a charged cloud.

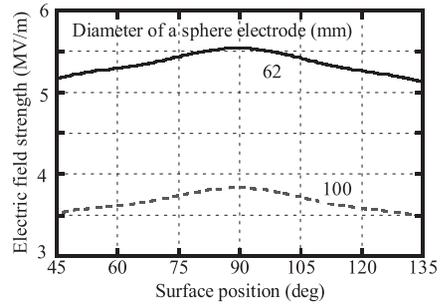


図 13 空間電荷密度 8 $\mu\text{C}/\text{m}$ 、長さ 4 m の電荷雲中心から 0.7 m の距離に置いた球電極表面の電界の強さ
Fig. 13 Electric field strength over the surface of a sphere electrode located at 0.7 m from the center of a 4 m-long charged cloud with a charge density of 8 $\mu\text{C}/\text{m}$.

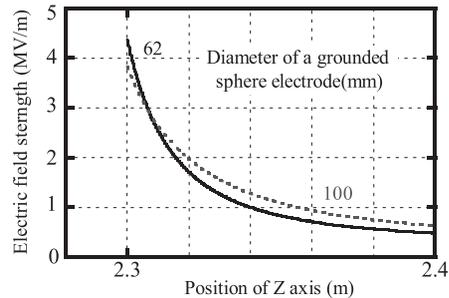


図 14 放電が発生した時の長さに設定した電荷密度 8 $\mu\text{C}/\text{m}$ の電荷雲に対する球電極先端近傍の電界の強さ
Fig. 14 Electric field strength at a vicinity of a sphere electrode under the condition of discharge inception for a charge density of 8 $\mu\text{C}/\text{m}$.

ときには、4 m 長より短い電荷雲でよいことを示している。

2 種類の球電極で放電が最初に発生した時間で電荷雲が形成された時の、すなわち、直径 62 mm あるいは 100 mm 球電極に対して長さ 1.7 m あるいは 4 m の電荷雲が形成されたときの球表面からの電界の強さの変化を図 14 に示す。直径 62 mm の球表面における最大電界は、100 mm の電極の 3.8 MV/m に比べて 4.3 MV/m と大きい。同じ程度になっている。電荷雲の方向に進むにつれ直径 100 mm の方が電界は強くなっている。これは、直径の小さい電極では電極表面に電界が集中し、電極から離れるとともに急激に減少するためである。この電界の大きさが高い値を持続する条件は、接地電極からの放電の進展に関係するものと考えられる。

4. 放電開始条件

接地球先端の電界分布から、ストリーマ放電開始条件式を用いて放電発生の有無を確認した。電極先端から電荷雲に向かう電界を E (kV/cm) で表したとき、大気圧中の空気中ではストリーマ放電の開始条件は式(2)で与えられる¹³⁾。

$$\int_0^{x_0} (\alpha - \eta) dx = \int_0^{x_0} 0.2 \times \{E(x) - 23.4\}^2 dx = K \quad (2)$$

ここで、電離係数 α および付着係数 η の差は実際に

表3 電極表面の電界の強さと放電開始条件
Table 3 Calculated electric field strength at an electrode surface and criterion for streamer discharge inception.

Diameter of electrode (mm)	Position of electrode (m)	Surface electric field strength (MV/m)	Ionization distance x_0 (mm)	K_{in} Eq. 2
100	0.5	3.55	11.1	10.0
100	0.7	3.84	13.9	16.3
100	1.0	3.21	8.1	3.5
62	0.7	4.38	11.8	24.8

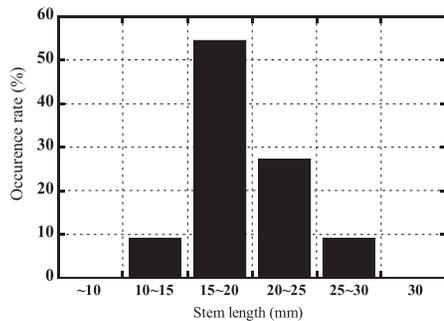


図15 直径100 mmの接地電極先端から電荷雲に向かって伸びる放電路根元の長さ

Fig. 15 The length of a stem of discharge channel extending from a 100-mm diameter sphere electrode toward a charged particle cloud obtained experimentally.

放電に関与する実効電離係数である。 x_0 (cm) は電離距離であり、電界の強さが23.4kV/cmになるまでの距離をとっている。式(2)における放電の開始時の定数 K の値は10~20である¹³⁾。

電荷密度8 $\mu\text{C}/\text{m}$ の帯電粒子雲と球電極との距離およびその直径を変えたときの電離距離 x_0 および K の値を表3に示す。電極の位置が0.5 mおよび0.7 mのときには、 K の値は10以上であり、放電開始条件を満たしている。一方、電極直径100 mm、球電極の位置が1 mのとき、 K の値は3.5であり、電荷雲の長さが4 mでは放電の開始条件を満たすことができないことを示している。

接地電極先端までの距離を0.7 m、帯電装置への印加電圧が19 kVのときの実験で得られた放電路の電極先端近傍で強く発光しているストリーマの長さは図15に示すように、15 mmを中心として分布している。計算で求められた積分距離 x_0 は11~14 mmの範囲にあり、実測されたストリーマの長さと同じ値を示している。電極先端の電界が放電開始条件を満たすときには、電離距離の範囲でストリーマが形成されており、ここから枝分かれをしてブラシ状の放電が進展していくものと考えられる。

5. まとめ

帯電粒子雲からの放電電荷量を用いて直径1 mの電荷雲を模擬し、電荷重畳法により帯電粒子雲周囲の電位、接

地球近傍の電界の強さを計算した。さらに、ストリーマ放電の開始条件を用いて、帯電粒子の噴出を開始してから最初に放電が発生したときの電荷雲の大きさから、求められた電界が放電開始条件を満たしていることを明らかにした。本研究で得られた主な知見は下記のとおりである。

- (1) 電荷密度が8 $\mu\text{C}/\text{m}$ で長さ8 mの帯電粒子雲中心部の電位は350 kVに達する。
- (2) 放電電荷量から求めた電荷密度8 $\mu\text{C}/\text{m}$ の電荷雲では、接地電極から放電が起きるときには、電極の位置に依らず、電極表面の最大の電界の強さは3.5~4 MV/mに達する。
- (3) ストリーマ放電開始条件から得られた電離距離は11~14 mmとなり、放電路の画像から測定したストリーマコロナの根元の長さに近い値を示し、少なくとも電離距離まで伸びるストリーマが形成されることが示された。

ここで使用した電荷雲モデルは雲内に固定した電荷分布を持つ線電荷で表した静的モデルである。電荷雲は静電反発力により時間とともに広がっていくので、広がり考慮した動的モデルを開発することが必要である。

参考文献

- 1) 富田一, 山際瑞樹, 大澤敦, 崔光石, 最上智, 鈴木輝夫: 初期放電の検出による静電気火災・爆発災害の予防技術の開発に関する研究. 労働安全衛生総合研究報告, JNIOOSH-SRR-NO.43 (2013) 1
- 2) I. D. Pavey: Electrostatic hazards in the process industries. Process Safety and Environmental Protection **82** [B2] (2004) 132
- 3) P. R. Amyotte: Some myth and realities about dust explosions. Process Safety and Environmental Protection, **92** (2014) 292
- 4) 富田一: 粉体の空気輸送中の貯蔵槽内での静電気放電による電圧の測定. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOOSH-SRR-NN.43 (2013) 19
- 5) A. Ohsawa: Computer simulation for assessment of electrostatics hazards in filling operation with powder. Powder Technology, **216** (2003) 135-136
- 6) L. M. Makalsky, A. V. Orlov and A. G. Temnikov: Possible mechanism of lightning strokes to extra-high-voltage power transmission lines. J. Electrostat., **37** (1996) 249
- 7) T. Sugimoto, S. Tanaka and Y. Higashiyama, K. Asano: formation of a charged droplets cloud and corona discharge between the cloud and a grounded electrode. IEEE Trans. IAS, **35** (1999) 225
- 8) 杉本俊之, 土居真一郎, 高橋 誠, 東山禎夫: 帯電粒子で生成された空間電荷雲内部の接地電極で起きる放電現象. 電気学会論文誌 A, **120-A** (2000) 761
- 9) T. Sugimoto, S. Doi, M. Takahashi and Y. Higashiyama: Distribution of electric field strength around a large-scale charge particle cloud. IEEE Trans. IAS, **37** (2001) 724
- 10) Y. Higashiyama, T. Sugimoto, M. Takahashi: Electrical discharge occurring from a space charge cloud formed with charged particles. J. Electrostat., **51** (2001) 381
- 11) Y. Higashiyama, S. Migita, K. Toki and T. Sugimoto: Electrical discharge occurring between a negatively charged particle cloud and a grounded sphere electrode. Electrostatics 2007, Oxford (2007)
- 12) 河野照哉, 宅間董: 数値電界計算法, p.38, コロナ社 (1980)
- 13) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編: 放電ハンドブック 上巻, p.268, 電気学会 (1998)