

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20510168

研究課題名(和文) コンピュータシミュレーションによる除電の高性能化

研究課題名(英文) Optimization of charge neutralization based on computer simulation

研究代表者

大澤 敦(OHSAWA ATSUSHI)

独立行政法人労働安全衛生総合研究所・電気安全研究グループ・上席研究員

研究者番号：20358435

研究成果の概要(和文)：除電の軸対称2次元電気流体モデルを開発して除電現象を調査した。得られた現象は実際のトラブルの原因を説明するものである。正・負イオン密度が時空間的にバランスされていないとオフセット電圧が生じることが判明した。除電の高性能化には系全体が準中性化されるように除電器で準中性化した正・負イオンを発生させることが重要である。この結果に基づき交流除電器のオフセット電圧を振動も含めて除去する方法を提案した。

研究成果の概要(英文)：Phenomena of charge neutralization with several types of ionizers were investigated on the basis of a 2D-electrohydrodynamic modeling. The results obtained could explain how practical troubles occur. It was found that any spatiotemporal charge due to unbalance in positive and negative ion densities yields an offset voltage on an object to be neutralized. For optimum neutralization, quasi-neutralized distribution in all regions is of great importance; therefore, ionizers with an ion source having quasi-neutralized charge densities are necessary. In addition, a modified method to get zero offset voltage for AC and pulse-DC ionizers was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：静電気工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：静電気障害，帯電，除電，コロナ放電，イオン，電気流体モデル

1. 研究開始当初の背景

除電は静電気障害防止対策の重要な方法のひとつであり，帯電が問題となる多くの工程で除電器を用いている。ナノテクノロジーなど最近の技術革新により，帯電しやすい材料や脆弱な静電気耐性の電子デバイスが生産されるようになり，静電気障害も様相を変えながら増大する傾向にある。短時間に精密に除電する高性能な除電器の開発が急務となっている。

一方，除電器はコロナ放電を用いたもの

が，その技術の簡便性から広く用いられているが，除電現象の理解は経験的なものであり，その技術も経験的な知識に依るところがほとんどである。技術革新に応じて要求される除電器の開発やトラブル対応も経験的に試行錯誤して解決しようとしているのが現実である。この状況は，あまりにも非効率的であり，根本的な解決にはなっていない。このような問題を理論的に方向付けて普遍的に解決しようとするのが本研究課題である。

2. 研究の目的

除電とは、イオン源（たとえば、コロナ放電）で生成されたイオンが、イオンの空間電荷と帯電物体により形成される電界と気流によって帯電物体へと輸送されて帯電物体の電荷を中和することである。したがって、除電技術の飛躍的進展には、いかに効率よくイオンを帯電物体に搬送するかがキーであり、除電後は除電器によって帯電されないよう正・負イオンのバランスも考慮されなければならない。そのためには、正・負イオンの挙動が理論的に解明されなければならない。これ以外に根本的な解決の道はないと考える。本研究の目的は理論的なアプローチ（シミュレーション）により正・負イオンの挙動を明らかにして、除電現象の理論的解釈、トラブルの原因追求と効率よく精密に除電するための知識を得ることである。

3. 研究の方法

(1) 除電モデリング

シミュレーションは、議論を一般化させるため、広く用いられている標準試験方法[1,2]を対象として、これに即したコードを作成している。

開発した軸対称 2 次元除電モデルはイオンソースモデル、正・負イオンの電気流体力学モデルおよびイオン電流-回路モデルから構成されている：

イオンソースモデル：コロナ放電の古典理論に基づくモデル[3]であり、たとえば、時間平均で同じ密度となる正・負イオン (n_{p0} , n_{n0}) を除電器表面 ($z = 0$, $r \leq 3$ cm) に与えている。AC およびパルス DC (以下 PDC) 除電器では正・負イオンが交互(50 Hz)にセットされる。AC コロナでは破壊電界以下では放電が発生しないので、これに相当する期間はイオン密度をゼロとしている。バランスされたときの除電器の正・負イオン密度を図 1 に示す；

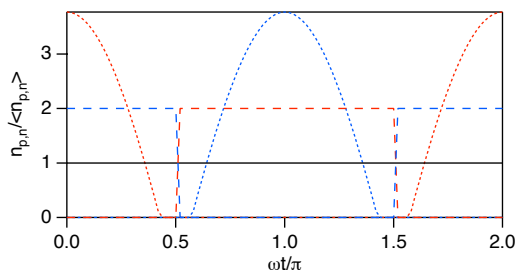


図 1 バランスされたときの除電器の正・負イオン密度 n_{p0} , n_{n0} : 実線: 正・負 DC, 点線: AC, 破線: PDC 除電器

正・負イオンの電気流体力学モデル：非圧縮性空気流の連続式・運動量保存式、

$$\partial \rho_a / \partial t + \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_a) = 0 \rightarrow \nabla \cdot (\rho_a \mathbf{v}_a) = 0$$

$$\rho_a \partial \rho_a / \partial t + \rho_a (\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_a = -\nabla P + e(n_p - n_n) + \nabla \cdot (\mu \mathbf{v}_a)$$

正・負イオン密度の連続式 (気流, ドリフト, 拡散, 再結合),

$$\partial n_p / \partial t + \nabla \cdot (n_p \mathbf{v}_p) - D_p \nabla^2 n_p = -\beta n_p n_n$$

$$\partial n_n / \partial t + \nabla \cdot (n_n \mathbf{v}_n) - D_n \nabla^2 n_n = -\beta n_p n_n$$

電場計算のポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi_L = 0, \nabla^2 \phi_s = -e(n_p - n_n) / \epsilon_0 \rightarrow \phi = \phi_L + \phi_s$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi$$

からなる；

イオン電流-回路モデル：チャージドプレート (以下 CP, 標準試験法に用いる帯電物体のことであり、導体を用いる) の電位を計算するモデル, CP 表面での電流の連続と Sato & Morrow[4]の式

$$I = e \int_V (n_p \mathbf{W}_p - n_n \mathbf{W}_n - D_p \nabla n_p + D_n \nabla n_n) \cdot \mathbf{e}_L dv = -C_{cp} d\phi_{cp} / dt$$

を用いている。

CP のサイズ (半径: 8.46 cm, 厚さ: 1 cm) と配置 (除電器との距離 45 cm, $z = 60$ cm の電位はゼロ) は除電器の標準試験法[12]に基づいており、このプレートの静電容量もこの標準の 20 pF としている。t = 0 の初期条件として除電器を作動 (イオン発生) および CP に 1.2 kV の正または負の初期電位を与えた。また、十分に定常状態に達したときに 1.2 kV の帯電電位を与えて、イオン応答も観測している。

(2) シミュレーション

この除電モデルをもとにシミュレーションを実施し、帯電電位極性、除電器の正・負イオン密度バランス、気流速度の影響を正負 DC・AC・PDC コロナ除電器について調査した。

4. 研究成果

先述した除電の軸対称 2 次元電気流体モデルを開発してイオン挙動を調査し、いくつかの除電現象を解明した。最も重要な成果は「時空間的に正・負イオン密度のバランスがとれていないところがあると、これがオフセット電圧を生じさせる。」ということである。つまり、除電の高性能化には系全体を準中性化させるような準中性化した正・負イオンを放出できる除電器が必須であることがわかった。さらに、AC および PDC 除電器のオフセット電圧をその振動成分も含めて効果的に低減させる方法をシミュレーションで確認して提案した。

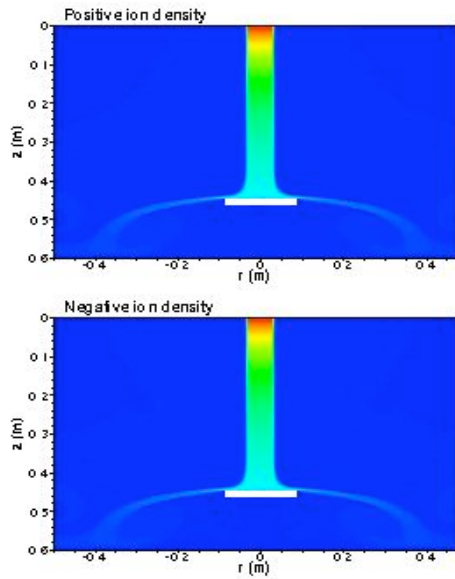


図2 正・負 DC 除電器の正イオン（上図）・負イオン（下図）の密度分布： $t = 3 \text{ s}$, $n_{p0} = n_{n0} = 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 除電器での気流速度 $v_{a0} = 3 \text{ m/s}$.

(1) 正負 DC 除電器

正負 DC 除電器では、除電器からの正・負イオン密度がバランスされるとすべての除電空間において空間電荷密度分布がほとんど準中性化（正・負イオン密度分布が同じ）される（図2）、オフセット電圧がほぼ 0 V になることがわかった（図3）。つまり、除電器から放出される正・負イオン密度が同じであると、空間電荷による電界がなくなるので、除電の初期段階では CP による電界と気流によって運ばれるイオンによって除電されて、除電後は気流のみによって同じ正・負イオン電流が流れるので帯電されることはない。つまり、除電器から放出される正・負イオン密度が同じであることが重要であることがわかった。

また、除電器からの正・負イオン密度が異なる時、密度が高い方のイオンによる空間電荷が除電器近傍のみに形成され、これによりオフセット電圧が生ずる。このオフセット電圧の極性は当然のことであるが、この空間電荷の極性と同じになる。この空間電荷の幅は気流速度が速くなれば広がるので、オフセット電圧も気流速度が速くなれば高くなる。このことは、以下のことからいえる。CP は絶縁されているので、定常状態では直流電流は流れない。つまり、正・負イオン電流が釣り合わなければならない。いま、どちらかのイオンが多く除電器から供給されているので、多い方のイオンを束縛する電位が CP に必要とされるので、多く供給されるイオンの極性に CP を帯電させることになる。

また、CP の帯電極性の除電時間への依存性は大きくないことも示されている。

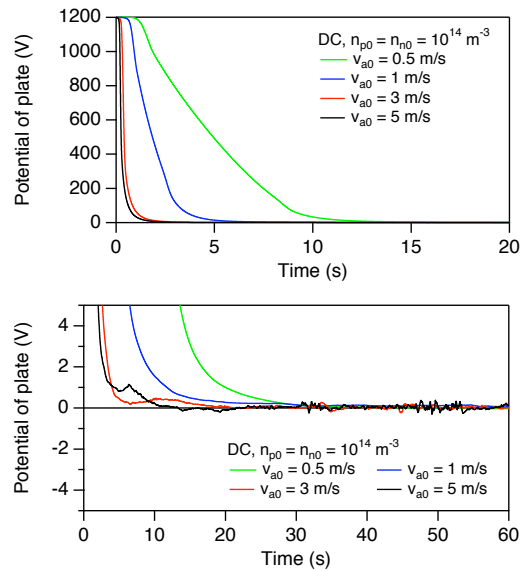


図3 正負 DC 除電器における CP の電位

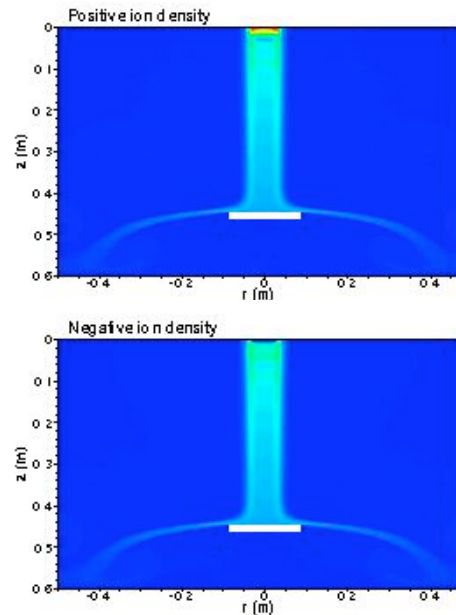


図4 AC 除電器の正イオン（上図）・負イオン（下図）の密度分布： $t = 3 \text{ s}$, $\langle n_{p0} \rangle = \langle n_{n0} \rangle = 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 除電器での気流速度 $v_{a0} = 3 \text{ m/s}$.

(2) AC および PDC 除電器

AC および PDC 除電器では、図4に示すように除電器近傍では交互に放出される正または負イオンの空間電荷が形成され、除電器から離れた位置では正・負イオンは準中性化される。たとえ一周で正・負イオン密度がバランスされたイオンが除電器から放出されても、正・負イオンの移動度の違い（本モデルでは正イオンの移動度の方が高い値を用いて

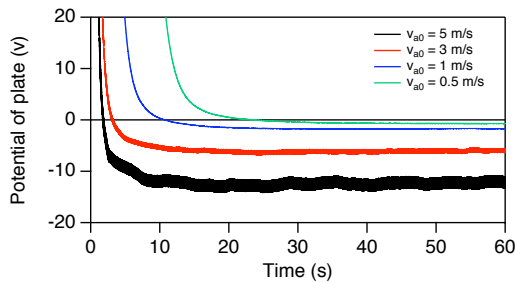


図 5 AC 除電器におけるオフセット電圧： $\langle n_{p0} \rangle = \langle n_{n0} \rangle = 10^{14} \text{ m}^{-3}$

いる)から CP にオフセット電圧が生ずる(図 5)。一般に移動度が高いイオンの方が多く CP に流れて移動度が高い方のイオンの極性に帯電すると予測できるが、結果はこれと異なっていた。これは、除電器で交互に現れる正・負イオンの空間電荷によって形成される電界がイオンを除電器に戻す方向に作用することに起因している。つまり、移動度が高い正イオンの方が除電器に戻る量が多くなり、これを補正するために CP が負に帯電されることになる。

また、この交互に現れる空間電荷はオフセットに変動をもたらしている。なお、図 5 の曲線が太くなっているのはこの変動のためである。

この除電器近傍に形成される空間電荷の幅は気流速度が速いほど広がるので、オフセット電圧も増加することになる。

この除電器に戻るイオンがある分だけ除電時間は正負 DC 除電器に比べてわずかであるが長くなる。

(3) オフセット電圧の改善

先の正負 DC 除電器で解ったように、系全体が準中性化されるときオフセット電圧を小さくできるので、このようなイオン分布を形成しようときに AC および PDC 除電器でもオフセット電圧を小さくできると予測できる。交流的に放出する正・負イオン密度を同じにして、除電器から放出するイオン電荷をトータルでゼロに(準中性化)すると、オフセット電圧をほぼゼロに、また、変動もなくせることをシミュレーションによって示した(図 6)。このようなイオン密度を発生する除電器は、いくつかのコロナ針電極の半分に印加する交流電圧を反転(180 度位相を変える)すれば可能であるので、実用化は容易と考える。

参考文献

- [1] IEC 61340-5-1 Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements (1998)
- [2] ANSI/EOS/ESD-S3.1-2006 ESD Association Standard Test Method for the Protection of

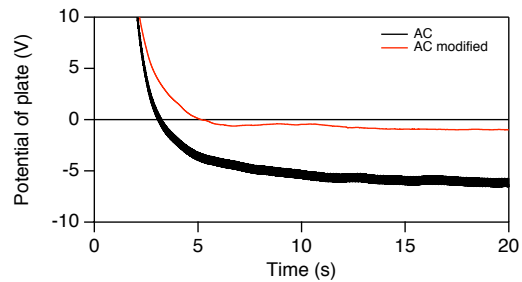


図 6 AC 除電器におけるオフセット電圧の改善

Electrostatic discharge Susceptible Items -- Ionization 2006

- [3] A. Ohsawa, J. Electrostat. 63 (2005) 767-773
- [4] R. Morrow, N. Sato, J. Phys. D: Appl. Phys. 32 (1999) L20-L22

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① A. Ohsawa, "In-tube transport of ions for charge neutralization," J. Phys. Conf. Ser. 査読有, 2008, 142, 012014-1-4

[学会発表] (計 2 件)

- ① 大澤敦, コロナ除電の電気流体モデリング, 2010 年度静電気学会静電気障害防止技術シンポジウム, 2010, pp.39-50
- ② 大澤敦, コロナ除電の 2 次元電気流体シミュレーション, 第 34 回静電気学会全国大会, 静電気学会講演論文集 2010, pp.113-114

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大澤 敦 (OHSAWA ATSUSHI)
独立行政法人労働安全衛生総合研究所・
電気安全研究グループ・上席研究員
研究者番号：20358435

(2) 研究協力者

R. Morrow, A.B. Murphy (CSIRO), 大内幹夫(東京電機大), 和泉健吉(シンド静電気), 野村信雄(春日電機)