

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：82629

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510214

研究課題名(和文)帯電した絶縁物のコロナ除電シミュレーション

研究課題名(英文)Simulations of corona charge neutralisation of insulators

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は絶縁物のコロナ除電現象を理論的に解明することである。正・負イオンの2次元電気流体力学シミュレーションを用いて導体除電との比較及び種々の初期表面電荷密度分布の絶縁物の除電現象を調査した。絶縁物除電では、イオン挙動が除電面の電荷だけでなく反対面の電荷に影響され、過除電の原因となることが示され、導体を用いる標準試験法で得られた除電器の性能評価結果を絶縁物除電に適用する場合の妥当性検討と問題点を指摘した。これらの結果からトラブルとなりうる除電不良の原因が解明され、これを防止するための除電器の使用法を提案した。さらにシミュレーションによって得られたオフセット電圧の最小化理論を実験で確認した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to clarify the phenomena of the corona charge neutralisation of insulators. We investigated the behaviour of ions during neutralisations with different density distributions of initial surface charges on an insulator and compared it with a conductor charge neutralisation using 2D electrohydrodynamic simulations of positive and negative ions. Since the motion of ions near the charged insulator is influenced by the charges not only on the front side surface but also on the opposite side, we found that it can lead to over-neutralisation causing problems. On this point, the phenomena of insulator charge neutralisation is significantly different from those of conductor one; thus, we investigated the validity of the standard evaluation test method of ionisers using a conductor. We suggest a proper use of ionisers to avoid the over-neutralisation. In addition, a method for minimising the offset voltage obtained from the simulation was demonstrated experimentally.

研究分野：複合新領域

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：除電 コロナ放電 イオン 電気流体力学シミュレーション 静電気障災害 火災 減災 品質管理

1. 研究開始当初の背景

除電は静電気障災害防止対策の重要な方法のひとつである。この静電気障災害とは静電気放電による爆発・火災、電子部品の破壊および帯電による生産障害である。たとえば、絶縁物が帯電して、それに人の指先などの接地した導体が近づくなどして静電気放電が起き、可燃性雰囲気を着火して重大な爆発・火災災害を起したり、半導体などの電子部品の破壊して深刻な生産障害を起している。放電が起きなくても帯電によって粉体やフィルムなどの製品の搬送不良、製品のコンタミネーションなど生産・品質管理に重大な問題を生じさせている。導体は接地すれば帯電防止できるが、帯電物体（製品またはその一部）が絶縁物である場合の静電気対策は除電に頼るしかないのが現状であり、多くの工程で除電器（イオナイザ）が用いられているが、その効果が不十分な場合もまれではない。さらに、ナノテクノロジーなど最近の技術革新により静電気障災害は様相を変えながら益々増大することが予測され、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、除電器の電荷発生手段（イオン源）としてコロナ放電が、その技術の簡便性から広く用いられている。最近では、紫外線、軟X線、放射性物質（Polonium-210: α 線）などを用いた除電器もあるが、安全性と経済性からもコロナ放電が有利である。何よりも放電の生成が、局所プラズマを形成するための針状電極と高電圧電源を用意して不平等電界を形成すれば可能であり、安定したイオン源を容易に供給できるからである。

しかしながら、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多い。モデリングとシミュレーションは現象の解明と技術の最適化に重要な役割を担うが、除電の理論的な研究報告もほとんどなく、プラズマ中に挿入したプローブ理論に基づいた解析¹があるが、これは、帯電物体からイオンの平均自由行程程度離れた領域で正・負イオンの密度が同じであるとして、ある帯電電位となった導体へのイオン電流を計算するものである。つまり、被除電物体の極く近傍のみの領域の計算に相当し、イオン挙動を体系的に矛盾な

¹J-S. Chang, *Neutralization theory of static surface charges by an ionizer under wide gas pressure environments*, IEEE Trans. Ind. Applicat. 37, 1641–1645 (2001).

く計算されない。このように少ないのは、除電器の開発・利用にはおそらく経験的な知識で十分であったからであろう。しかしながら、科学技術の進歩による電子部品の高密度化、フィルムの薄膜化および粉体粒子の微細化などにより、10 V以下の低電圧でも破壊・故障する静電気に敏感な電子部品、グラビア印刷時のフィルムの除電むらによる不良、微粉体輸送の不具合など、これまでのように経験的な知識では対応できない事象が多くなってきている。これらの除電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。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を与えて普遍的に解決しようとするのが、筆者の一連の研究の除電モデリングとシミュレーションであり、これまで、イオンのチューブ搬送の高効率化²および除電器の標準性能試験法³（被除電物体は導体）をベースとして精密除電⁴に必要な条件を見出し、これら成果が採用されて製品の除電性能向上に貢献している。

しかしながら、実際の被除電物体は絶縁物であるので、先述の諸問題を解決するには現実の除電現象、つまり、絶縁物の除電現象を明らかにしなければならない。

2. 研究の目的

除電プロセスとは、なんらかの方法（たとえばコロナ放電）で生成された正・負イオンが、イオンの空間電荷と帯電物体による電界または/およびエアブローの気流によって帯電物体へと輸送され、到達したイオンの電荷によって帯電物体の電荷を中和することである。したがって、このプロセスの飛躍的進展には、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。

さらに、除電器が対象とする実際の帯電物体

²A. Ohsawa: In-tube transport of ions for charge neutralization, J. Phys. Conf. Ser. 142 (2008) 012014 (4pp).

³IEC 61340-5-1, *Electrostatics – Part 5-1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements*, 1988.

⁴(a) A. Ohsawa: Modeling of charge neutralization by ionizer, J. Electrostat. 63 (2005) 767–773; (b) A. Ohsawa: Efficient charge neutralization with an ac corona ionizer, J. Electrostat. 65 (2007) 598–606; (c) A. Ohsawa: 2-D electrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionisers, J. Electrostat. 71 (2013) 116–124.

は絶縁物である。絶縁物では、帯電と反極性のイオンが到達した表面が部分的に除電され、比較的薄い絶縁物では、そのイオン挙動が除電面の表面電荷だけでなく、裏面の電荷の影響を受ける。つまり、絶縁物除電では、表面電荷密度分布とこれに対応した被除電物体近傍のイオン挙動が重要となってくる。したがって、絶縁物と導体では除電現象は大きく異なることが予測でき、帯電電位測定の簡便性から被除電物体として導体を用いる除電器の標準性能試験法で評価した結果をそのまま絶縁物に適用してよいのか疑問であるが、この適用の妥当性についても検討されていないのが現状である。そもそもこのような安易な考え方が除電の諸問題の根本的な原因であるように思える。問題解決にはこの導体除電と絶縁物除電の比較が必須となる。

絶縁物の除電現象の解明には、正・負イオンの挙動を理論的に解明することが必須であり、これ以外に根本的な解決の道はない。絶縁物の表面電荷密度を局所的に表裏を分けて測定することは不可能であり、実験的調査が困難でもある。本研究では、この絶縁物除電プロセスを体系的にモデル化し、理論的なアプローチにより絶縁物の除電現象の理論的解釈と効率的かつ精密な除電のための知識を得ることを目的としている。さらに、導体と比較して、標準試験法の妥当性も検討される。また、実際に起きている諸問題をシミュレーションによって再現し、その原因追求と問題解決の手段を提案する。

3. 研究の方法

(1) イオンの電気流体力学モデル

ここで構築した除電モデルは、下記のように非圧縮性空気流の連続式（質量保存式）・運動量保存式、正・負イオンの連続式（正・負イオン流）およびポアソンの式（電界）を時々刻々に計算して、除電器から放出された正・負イオンの挙動をセルフコンシステントに解く電気流体力学モデルが骨子となり、これにイオンソースモデルと被除電物体表面での除電モデル（表面での電流連続）を追加し、除電プロセスを体系的に計算できるようにしている。

- 1) イオンソースモデル⁴：Peekの正・負コロナ開始電界の経験式、Townsendのコロナ電流の式を用いて除電器から放出するイオン密度を計算する。

- 2) 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、正・負イオン密度の連続式（気流、ドリフト、拡散、再結合）、電界を求めるポアソンの式

- 3) 被除電物体の除電モデル：被除電物体表面での電流連続式

エアブロー型の除電器からの空気流を求める非圧縮性流体の連続式と運動量保存式は、

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_a = 0, \quad (1)$$

$$\rho_a \frac{\partial \mathbf{v}_a}{\partial t} + \rho_a (\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_a = -\nabla P + \mathbf{F}_E + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}_a), \quad (2)$$

で表される。ここで、 $\mathbf{F}_E = e(n_p - n_n)\mathbf{E}$ 、 \mathbf{v}_a 、 ρ_a 、 P 、 μ はイオンによる電気力密度、空気流速、空気の質量密度、圧力、粘性係数である。

コロナ針電極近傍を除いて電界は電離が起きるほどに高くなく、低電界では電子付着係数が高くなるので、除電器の外側では電子は負イオンになっているとして無視している。正・負イオンの挙動はそれぞれ次のイオン密度の連続式

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \nabla \cdot (n_p \mathbf{v}_p) - D_p \nabla^2 n_p = -\beta n_p n_n, \quad (3)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \nabla \cdot (n_n \mathbf{v}_n) - D_n \nabla^2 n_n = -\beta n_p n_n, \quad (4)$$

で表される。ただし、 n_p 、 n_n は正・負イオン密度、 $\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_a + \mathbf{w}_p$ 、 $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}_a + \mathbf{w}_n$ ； $\mathbf{w}_p = \mu_p \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{w}_n = -\mu_n \mathbf{E}$ である。正イオンの移動度は $\mu_p = 2.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ 、負イオンは $\mu_n = 1.86 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ($|E|/N \leq 50 \text{ Td}$)、 $\mu_n = 2.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ($|E|/N > 50 \text{ Td}$) である⁵。ただし、 N はガス密度。実行したシミュレーション条件では、電界 E は $|E|/N \leq 50 \text{ Td}$ を満たすので、 $\mu_p > \mu_n$ である。正・負イオンの拡散係数はそれぞれ $D_p = 2.89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $D_n = 4.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ である⁶。正イオンと負イオンの再結合係数は $\beta = 2.0 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$ である⁵。

電界を求めるためにポアソンの式

$$\nabla^2 \phi = -e(n_p - n_n)/\epsilon_0, \quad (5)$$

および

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (6)$$

⁵R. Morrow, J.J. Lowke: Streamer propagation in air, J. Phys. D: Appl. Phys. **30** (1997) 614-627.

⁶本多侃士：気体放電現象、東京電機大学出版、1988.

を用いる。ここで、 ε_0 は空間の誘電率、 ϕ は電位である。

数値的計算手法として、空気を解くために HSMAC (Highly simplified marker-and-cell) 法⁷、イオン密度の連続式の移流項は FCT (Flux-corrected transport)⁸、ポアソンの式は SOR (Successive over-relaxation)⁹を用いた。

時々刻々に除電される被除電物体の局所表面電荷密度は、絶縁物の局所的表面での電流連続から、

$$\frac{\partial \sigma_s}{\partial t} = e [a_1 n_p \mathbf{W}_p - a_2 n_n \mathbf{W}_n + a_3 n_p \mathbf{v}_a - a_4 n_n \mathbf{v}_a - D_p \nabla n_p + D_n \nabla n_n] \cdot \mathbf{n}, \quad (7)$$

より求めた。ここで、係数 a_1, \dots, a_4 はイオンフラックスが被除電物体に向かうときは 1 とし、そうでなければ、被除電物体からイオンが再放出しないとして 0 とした。イオンがイオンの状態のまま表面に半永久的に付着しているというのは考えにくいので、イオンの再放出はないとし、正・負イオンは被除電物体表面で再結合または電子脱着し、表面で電荷交換されるモデルである。

(2) 導体との比較

除電器が実際に対象とする帯電物体は絶縁物であるが、標準の性能試験法では、測定の簡便性から被除電物体を導体としている。この性能試験結果を実際の除電物体である絶縁物にそのまま適用できるか、その妥当性が検討されていない。導体と同じ初期表面電荷密度分布となる絶縁物の除電シミュレーションを標準試験法をベースにして実施し、導体と絶縁物の除電現象の違いを明らかにし、標準性能試験法の妥当性を検討する。

(3) 種々の初期表面電荷密度分布の除電

導体との比較のシミュレーションにより、除電過程の途中で絶縁物の被除電物体近傍のイオン挙動が絶縁物の反対側の表面電荷とイオンの空間電荷に影響されて、逆帯電や表裏で帯

電極性が異なる両極性帯電が生ずることがわかったので、予期できる除電の諸問題と対応させて、表裏ともに正帯電、表側のみ正帯電、裏側のみ正帯電、表側が正帯電で裏側が負帯電の 4 タイプの初期表面電荷分布の絶縁物の除電現象を調査する。

(4) オフセット電圧最小化理論の実験的検証

シミュレーションによって得られたオフセット電圧を理論的に除去できる方法を実験により実証する。

4. 研究成果

(1) 導体との比較

絶縁物の初期表面電荷分布を導体のそれと同様にして、軸対称 2 次元の電気流体力学シミュレーションにより、導体と絶縁物の除電現象を比較した [3, 8, 9]。図 1a に示すように、標準試験法では CP (チャージドプレート; 導体である) の静電容量を 20 pF (このシミュレーションで配置された CP 自体の静電容量は 8.2 pF) にしているため、CP の除電時間は絶縁物のそれよりも長くなるので、除電時間に関しては標準試験法の性能結果を採用しても問題はないが、除電過程の途中で絶縁物の被除電物体近傍のイオン挙動が絶縁物の反対側の表面電荷とイオンの空間電荷に影響されて、図 1b のように逆帯電や表裏で帯電極性が異なる両極性帯電が生ずることがわかった。このような過除電が除電による諸問題の原因となっていることが予測できる。

(2) 種々の初期表面電荷密度分布の除電現象

実際に起きている除電の諸問題が、この過除電 (除電不良) が原因と予測でき、これが絶縁物の表面電荷分布に影響されるので、表裏ともに正帯電、表側のみ正帯電、裏側のみ正帯電、表側が正帯電で裏側が負帯電の 4 タイプの初期表面電荷密度分布 ($1 \mu\text{C}/\text{m}^2$) の絶縁物の除電現象を調査した [4, 7]。表側のみが帯電する場合を除いて、たとえば、図 2a のように除電過程の途中で逆帯電や両極性帯電 (裏側の初期表面電荷密度と同じ程度まで表側が帯電される) が生じ、また、このとき表面電位が 0 V 近くになっている (図 2b)。このことは、被除電物体の表面電位モニタリングで電位が十分に減少したとしても、実際は除電できていないことも十分にあり得ることを示している。このシ

⁷C.W. Hirt, J.L. Cook: Calculating three-dimensional flows around structures and over rough terrain, J. Comput. Phys. **10** (1972) 324-340.

⁸(a) S.T. Zalesak: Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids, J. Comput. Phys. **31** (1979) 335-362; (b) C.R. DeVore: An improved limiter for multidimensional flux-corrected transport, NRL/MR/6440-98-8330, Naval Research Laboratory, (1998).

⁹W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery: Numerical recipes in C, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 1992.

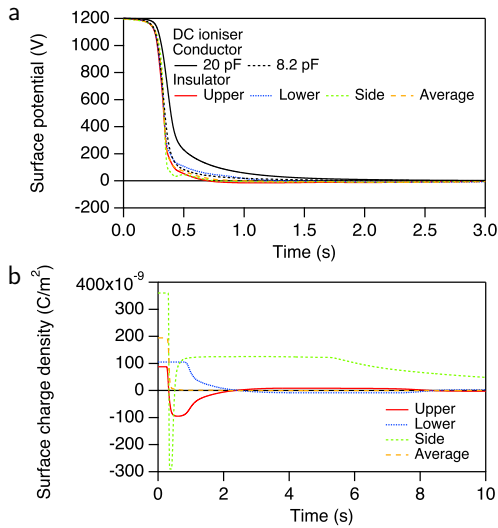


図 1: 除電中の導体および絶縁物の表面電位の減衰 (a) と絶縁物の表面電荷密度の変化 (b) (DC 除電器: 放出イオン密度 $n_{p0} = n_{n0} = 1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 放出気流速度 $v_{a0} = 3.0 \text{ m/s}$)

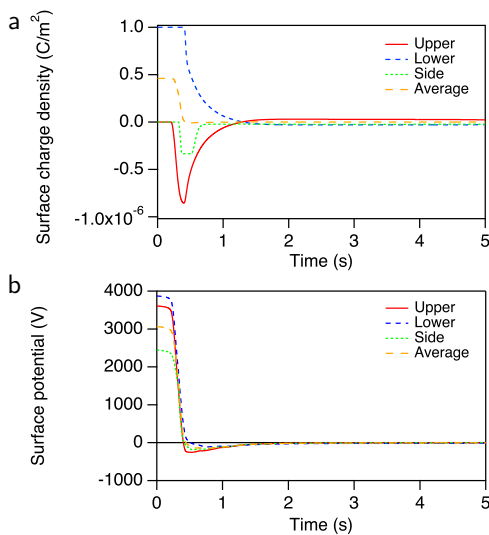


図 2: 除電中の絶縁物の表面電荷密度 (a)・電位 (b) の変化 (裏面のみ正帯電, DC 除電器: 放出イオン密度 $n_{p0} = n_{n0} = 1.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$, 放出気流速度 $v_{a0} = 3.0 \text{ m/s}$)

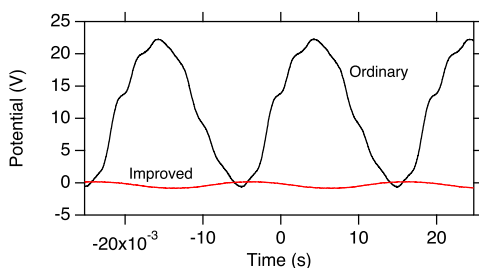


図 3: オフセット電圧最小化理論の実証

ミュレーションでは、絶縁物の断面積が標準試験法の CP と等しく比較的小さいので、イオンが裏側まで到達でき、最終的には絶縁物の表面電荷が問題がない程度までに除電されるが、被除電物体が大きい、移動している、または、除電器でエアブローを用いていない場合はイオンが裏側まで到達するのが困難となり、特に初期表面電荷密度が高いときブラシ放電や沿面放電を誘因する重大な問題を除電によって引き起こす可能性が高い。実際にこのようなトラブルが起きていることから、このシミュレーションは除電の諸問題の原因を明らかにしたことになる。この除電器自体が引き起こす除電不良を避けるためには帯電面を十分に把握して、帯電面を除電するように、また、表裏ともに帯電している場合は同時に表裏を除電するように除電器を配置しなければならない。

(3) オフセット電圧最小化理論の実験的検証

AC やパルス DC 除電器でも、常時同密度の正・負イオンを放出することができれば、振動成分も含めてオフセット電圧を除去できるというシミュレーションによって得られた理論 [5, 10] を、図 3 に示すように、実験的に確認した [2, 6]。

(4) 今後

一般的な除電方法である被除電物体の片側のみに除電器を配置する場合、除電器側の表面のみが帯電している場合を除いて過除電が除電過程に生ずることが解ったので、提案した解決策の妥当性を詳細に検討するための両面同時または横からの除電 (問題が生じないか確認する) およびローラ搬送フィルムの除電のシミュレーションは継続的に実施している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- [1] 大澤敦, コロナ除電の電気流体力学シミュレーション, 特集解説論文, 静電気学会誌, 査読有, 38 (2014) 145–150.
- [2] A. Ohsawa, N. Nomura, *An improvement on AC ionisers to minimise the offset voltage*, J. Electrostat., 査読有, 71 (2013) 1083–1085.
- [3] A. Ohsawa, *Computational comparison of charge neutralisations of conduc-*

tors and insulators with corona ionisers, J. Electrostat., 査読有, 71 (2013) 801–807.

- [4] A. Ohsawa, *Computer simulations of insulator charge neutralisations with a corona ioniser – Influence of initial surface charge distribution*, J. Electrostat., 査読有, 71 (2013) 287–293.
- [5] A. Ohsawa, *2-D electrohydrodynamic simulations towards zero offset voltage with corona ionisers*, J. Electrostat., 査読有, 71 (2013), 116–124.

〔学会発表〕（計 5 件）

- [6] 大澤敦, 野村信雄, コロナ除電器のオフセット電圧の最小化 - 実証, 第 37 回静電気学会全国大会 (9/10, 2013) 千葉
- [7] A. Ohsawa, *Computer simulations of insulator charge neutralisations with a corona ioniser – Influence of initial surface charge distribution*, 12th International Conference on Electrostatics, Electrostatics 2013, 査読有 (4/17, 2013) Budapest.
- [8] 大澤敦, 絶縁物除電モデリング – 導体との比較, 第 36 回静電気学会全国大会 (9/14, 2012) 八戸

- [9] A. Ohsawa, *Comparison of charge neutralisations of conductors and insulators with corona ionisers*, 2012 Electrostatics Joint Conference, 査読有 (6/13, 2012) Cambridge, ON, Canada.
- [10] 大澤敦, AC またはパルス DC コロナ除電のオフセット電圧の最小化, 第 35 回静電気学会全国大会 (9/12, 2012) 東京

6. 研究組織

1) 研究代表者

大澤 敦 (OHSAWA, Atsushi)
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

- 野村 信雄, 春日電機・部長
- 大内 幹夫, 東京電機大学・教授
- R. Morrow, University of Sydney, Honorary
- A.B. Murphy, CSIRO, Senior Principal Scientist