

電極加熱による低発塵コロナ放電式イオナイザーの開発

佐藤 朋且^{*.1}, 鈴木 政典^{*}, 水野 彰^{**}

(2013年5月8日受付; 2013年7月22日受理)

Development of Low-particle-emission Corona Discharge Ionizer
by Electrode HeatingTomokatsu SATO^{*.1}, Masanori SUZUKI^{*}, Akira MIZUNO^{**}

(Received May 8, 2013; Accepted July 22, 2013)

Corona discharge type ionizers are widely utilized in clean rooms, such as those for LCD manufacturing processes. However, these ionizers are also known to generate particles due to the deposition of particles to electrodes and the release of particles into air of clean room. In order to resolve this problem, we devised a method for inhibiting the deposition of particles to electrodes, by heating the electrodes and utilizing the thermophoretic force that is generated. We were then able to obtain the following results :

(1)Using the deposition velocity of particles, we calculated the temperature gradient necessary to inhibit their deposition. The temperature gradient for inhibiting the deposition of particles 0.001 μm or larger was found to be 100 $^{\circ}\text{C}$ per 1mm. (2)We conducted an experiment of heating of an ionizer electrode to approximately 90 $^{\circ}\text{C}$. The result was that compared to a non-heated case, the amount of deposition of particles on the electrode was reduced. (3)As a practical method of ionizer electrode heating, we devised a self-heating type electrode that utilizes Joule heating of a resistive element. It was found as a result of this experiment that it was possible to heat the electrode to the desired temperature.

1. はじめに

一般に、液晶製造等のクリーンルームは、静電気が非常に発生し易い環境となっており、ガラス基板の表面上に空気中の塵埃を付着させる静電吸着 (ESA: Electrostatic Attraction) や、静電気放電 (ESD: Electrostatic Discharge) による集積回路の絶縁破壊、および ESD で発生した電磁干渉 (EMI: Electromagnetic Interference) による生産装置の誤動作等の生産障害を引き起こし、製品の歩留まり低下の問題となっている。これらの障害を防ぐ静電気対策の一つとして、イオナイザーによる静電気除去 (除電) が挙げられ、コロナ放電方式、放射線方式 (軟 X 線方式)、紫外線方式等によるものが知られている。中でもコロナ放電式は他の方式に比べて安価で簡便なため広く利用されている。しかし、このコロナ放電式のイオナイザーは、クリーンルームの空気中に含まれる微量

な異物 (主にシリコンシーラントから脱ガスしたシロキサンガスがコロナ放電により粒子化した SiO_2) の電極への析出・飛散と、電極自身の摩耗の主に 2 つの原因 (図 1) によって発塵していることが知られており¹⁾、清浄環境下においては発塵源となってしまう問題が生じている。そこで筆者らは、高純度 N_2 ガスで電極周囲をパージすることによりシロキサンの析出を低減するシースエア機能と、耐摩耗性特殊金属の放電電極を搭載した、低発塵のシースエア式イオナイザーを考案し、クリーンルームにおける静電気除去に対応してきた²⁾。しかしながら、近年の液晶ガラス基板の大型化に伴い、シースエア式イオナイザーも大型化したことから、高純度 N_2 ガスの使用量が増加し、ユーザーからその削減が求められるようになってきた。そこで、シースエア方式に代わり、電極を加熱することで発生する熱泳動力を利用して電極への異物の析出を抑制する、電極加熱による低発塵イオナイザーを考案した。温度勾配のある場に微粒子が存在する場合、微粒子が低温側に向かう力を受け移動する現象を熱泳動といい、この時微粒子が受ける低温側に向かう力を熱泳動力という³⁾。本報では、イオナイザー電極への異物 (シロキサン) 析出が、クリーンルーム中のシリコンシーラントからのシロキサンガスが電極近傍で粒子化し、その微粒子 (SiO_2) が電極へ付着することによって生じていると仮定し、電極を加熱することで得られる熱泳動力によってその抑制が可能であるか検討を行った

キーワード: クリーンルーム, イオナイザー, シロキサン, コロナ放電, 熱泳動力, 沈着速度

* 株式会社テクノ菱和

(〒156-0052 東京都世田谷区経堂 5-33-6)

Technical R&D Center, Techno Ryowa LTD., 33-6, Kyodo 5-Chome, Setagaya-ku, Tokyo 156-0052, Japan

** 豊橋技術科学大学

(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

¹ t_satou@techno-ryowa.co.jp

た。また、実用的な電極の加熱方法についても併せて検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 微粒子付着の抑制に必要な温度勾配の概算

熱泳動力によってイオナイザー電極への微粒子付着を抑制するためには、その熱泳動力を得るための温度勾配を電極と周囲の空間との間に形成する必要がある。ここでは、その必要な温度勾配を気相中での微粒子の沈着速度から概算して、電極への微粒子付着抑制の可能性を検討する。微粒子の沈着のメカニズムとしては、ブラウン拡散や重力沈降、今回検討する熱泳動力の他、電界の影響がある場合には静電気力が作用する。これら沈着力のうち、イオナイザー電極を加熱することで得られる熱泳動力が、沈着と逆方向に作用して微粒子付着が抑制されるモデル(図2)を設定して概算を行う。しかし、実際のイオナイザー電極近傍における微粒子の挙動から各種沈着速度を導くには系が複雑なため、Liuら⁴⁾が提唱した、垂直一方向流内で水平に置かれたウェハー表面への微粒子沈着のモデルにおける沈着速度の推定式を適用した。Liuらは、Sparrowら⁵⁾の行ったナフタリンを円板上から昇華させたときの物質移動の実験式をウェハー表面への微粒子沈着に適用しているが、以降多くの研究者によって研究が進められ、国内においても藤井ら⁶⁾、阪田ら⁷⁾によってその妥当性が実験的に示されている。Liuらが提唱した微粒子の沈着速度 V_T は(1)式で与えられる。(1)式にウェハーを加熱することによる熱泳動速度 V_{TM} ⁸⁾を加算すると、沈着速度 V_T は(2)式となる。種々の沈着速度はそれぞれ(3)~(6)式で表される。加算する熱泳速度 V_{TM} は低温方向、つまり付着と逆方向に働くため負の符号が付いており、これが図3のようにブラウン拡散等の沈着速度を上回る場合に、微粒子付着が抑制される。この時(2)式は $V_T = V_{TM} + V_D + V_G + V_E < 0$ となり、この条件での熱泳動速度 V_{TM} から必要な温度勾配 ΔT を求める。各式に用いる各係数や諸条件は以下のように与える。

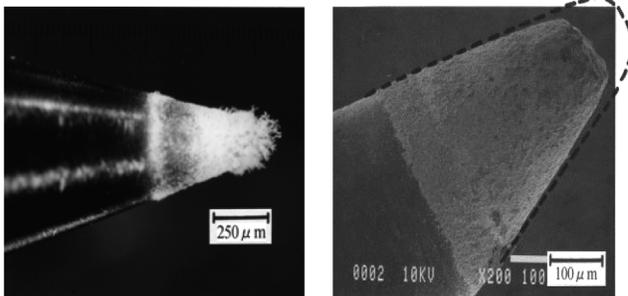


図1 電極への異物付着と電極の摩耗
Fig.1 Particle deposited on an electrode and wear of an electrode.

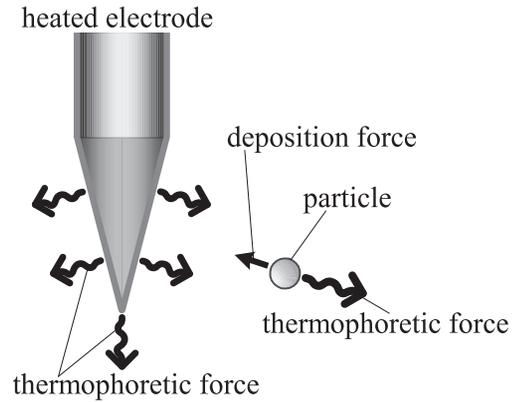


図2 熱泳動力による微粒子付着の抑制(電極)
Fig.2 Inhibition of particle deposition by thermophoretic force (heated electrode).

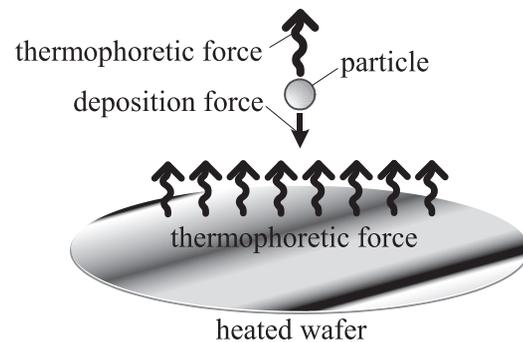


図3 熱泳動力による微粒子付着の抑制(ウェハー)
Fig.3 Inhibition of particle deposition by thermophoretic force (heated wafer).

$$V_T = V_D + V_G + V_E \quad (1)$$

$$V_T = V_{TM} + V_D + V_G + V_E \quad (2)$$

V_{TM} : 熱泳動力による沈着速度 [m/s]

V_D : ブラウン拡散による沈着速度 [m/s]

V_G : 重力による沈着速度 [m/s]

V_E : 静電気力による沈着速度 [m/s]

$$V_{TM} = \frac{-0.55\eta\Delta T}{\rho_g T} \quad (3)$$

$$V_D = 1.08 \left(\frac{D}{D_w} \right) S_c^{1/2} R_c^{1/2} \quad (4)$$

$$V_G = \frac{C_c \rho_p D_p^2 g}{18\nu} \quad (5)$$

$$V_E = \frac{C_c F}{3\pi\eta D_p} \quad (6)$$

$$F = \frac{\pi}{4} D_p^3 \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)}{\varepsilon_r + 2} \cdot \text{grad} E_0^2 \quad (7)$$

D : 拡散係数 [m²/s]

D_w : ウェハー直径 150 [mm]

S_c : シュミット数 (= ν/D) [-]

- R_e : レイノルズ数 (= UD_w/v) [-]
- v : 空気の動粘度 1.56×10^{-5} [m^2/s]
- C_c : カニンガムの補正係数 [-]
- U : 垂直一方向流 0.35 [m/s]
- D_p : 粒子径 [m]
- F : グレーディエント力
- ϵ_0 : 真空の誘電率 8.85×10^{-12} [F/m]
- ϵ_r : SiO_2 粒子の比誘電率 4.6 [-]
- E_0 : 電極先端部の電界強度 [V/m]
- g : 重力加速度 9.8 [m/s^2]
- ρ_p : 粒子の密度 [kg/m^3]
- η : 空気の粘度 1.82×10^{-5} [kg/ms]
- ρ_a : 空気の密度 1.197 [kg/m^3]
- ΔT : 温度勾配 [K/m]
- T : 空気の絶対温度 296 [K]

$$E = \frac{2fV}{\{f^2 - (d-x)^2\} \ln\{(f+d)/(f-d)\}} \quad (8)$$

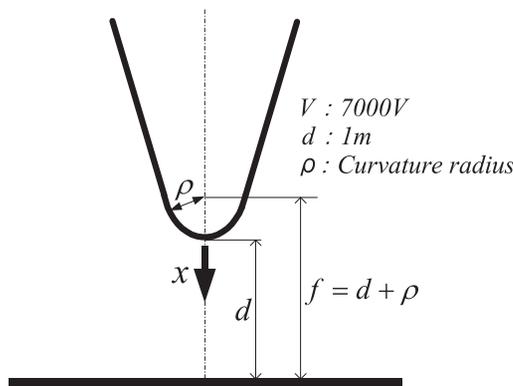


図4 回転双曲面对平板モデル
Fig.4 Hyperboloid of revolution versus plate model.

ただし、対象とする粒子径は、 0.001μ から $0.1 \mu m$ までの範囲とし、粒子は無帯電粒子とした。イオナイザーの放電電極近傍の電界中で無帯電粒子に作用する静電気力をグレーディエント力 F として (7) 式⁹⁾、電界強度 E_0 は印加電圧 AC7 kV の交流式イオナイザーの放電電極が形成する電界強度として図4の回転双曲面对平板モデルから (8) 式¹⁰⁾にて求め、微粒子に作用する静電気力による沈着速度 V_E に適用した。各粒子径における温度勾配 ΔT の概算結果を図5に示す。図5から、粒子径が $0.001 \mu m$ の微粒子が対象であれば、熱泳動力によって付着を阻むために必要な温度勾配 ΔT は約 $100,000$ [K/m] 強、粒子径が $0.01 \mu m$ 以上の微粒子が対象であれば、必要な温度勾配 ΔT は約 $5,000$ [K/m] 以下となる。熱境界層の厚さが通常 $1 mm$ 以下^{11,12)}であることを考慮すると、

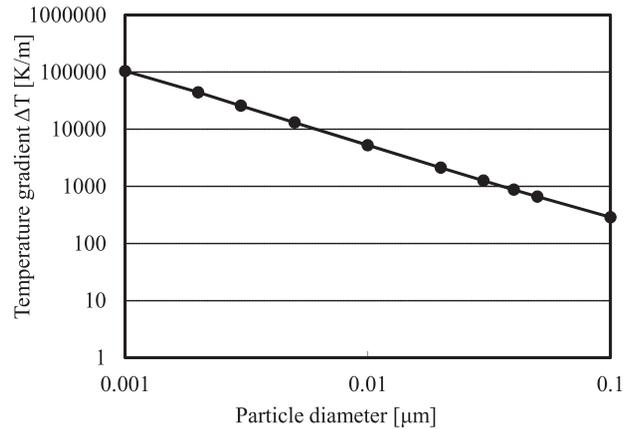


図5 微粒子付着抑制に必要な温度勾配の概算結果
Fig.5 Result of rough estimate temperature gradient necessary to inhibiting the deposition of particles.

この結果から、イオナイザー電極を加熱して、周囲の空間との間に $100^\circ C$ 程度の温度差を形成することで、 $0.001 \mu m$ 以上の微粒子の付着を抑制できる可能性があると考えられる。

3. 実験による微粒子付着抑制効果の確認

3.1 実験概要および方法

微粒子付着抑制に必要な温度勾配の概算結果から、電極を加熱することで微粒子の付着を抑制できる可能性が示唆されたので、実際のイオナイザーを用いて微粒子付着の抑制効果の確認実験を行った。実験装置の概略を図6に示す。実験に用いたイオナイザーは交流式 (パルス AC タイプ) で、電極への印加電圧は AC7 kV、交番の周波数は 33 Hz、電極の直径は $\phi 2 mm$ である。このイオナイザーを2台使い、一方の電極を加熱し (イオナイザーA)、もう一方を加熱無し (イオナイザーB) の状態で一定時間運転し、運転後の電極先端部の異物の付着状況を実体顕微鏡 (KEYENCE 製 VXH-1000) にて観察して比較した。イオナイザーAの電極の加熱温度は、温度

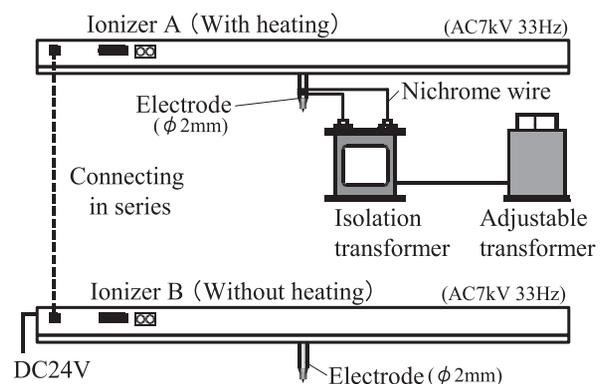


図6 実験装置の概略
Fig.6 Experimental setting up.

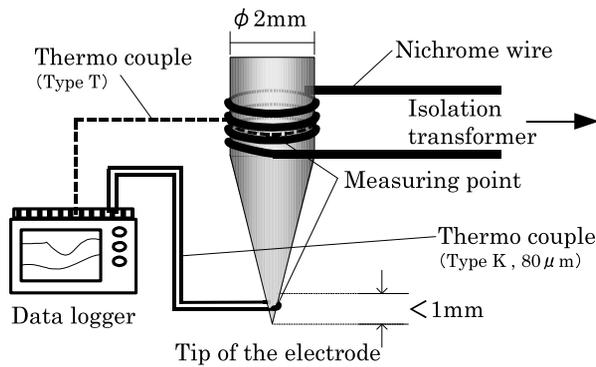


図7 電極の温度測定の詳細
Fig.7 Details of electrode temperature measurement.

勾配の概算結果が $0.001 \mu\text{m}$ 以上の粒子では 100°C 前後であったことと、イオナイザーの樹脂部分の耐熱温度が $100\sim 130^\circ\text{C}$ であることから、 90°C 程度を目標とした。電極の加熱には、ニクロム線を用いた。電極の先端から $3\sim 4 \text{ mm}$ 上部(先端テーパ部から円柱状になった部分)にニクロム線を数回巻き付け、電極の温度が目標の 90°C となるように、絶縁トランスの直流電圧をスライダックで調整しながら印加して加熱した。電極の温度は、ニクロム線を巻き付けた部分(加熱部)を通常のT型熱電対にて、電極先端の直近部分(先端部から 1 mm 以内)を極細型の特種K型熱電対(線径 $\phi 80 \mu\text{m}$)にて測定した。電極の温度測定の詳細を図7に示す。電極の先端部が直径約 $50 \mu\text{m}$ と極めて微細で、ニクロム線の巻き付けや熱電対の取り付けが困難なため、この方法で加熱および温度測定を行っている。なお、実際の電極先端部分の温度が上記の理由で測定できないため、ニクロム線を巻き付けた加熱部を 90°C とした時の電極先端部分の温度について、数値シミュレーションによる確認を行った。シミュレーション計算対象の電極、およびイオナイザー筐体の形状は実物と同様とし、イオナイザー筐体の上部から 23°C 、 0.3 m/s の層流条件で給気し、下部から排気する条件で計算を行った。また、一連の実験は、先ずイオナイザーAの電極の温度が目標の 90°C となるよう絶縁トランスの出力電圧を設定し、その後、熱電対を取り外した状態でイオナイザーA、Bの2台を同時に運転し、異物付着量の比較を行う手順とした。温度測定用の特殊熱電対の取り付け位置が電極先端直近のため、特殊熱電対が異物の付着状況に影響することを防ぐためである。

3.2 実験結果

ニクロム線を巻き付けた加熱部を 90°C とした時の特殊熱電対による電極先端の直近部分(先端部から 1 mm 以内)の温度測定結果を図8に、電極先端部分の温度の

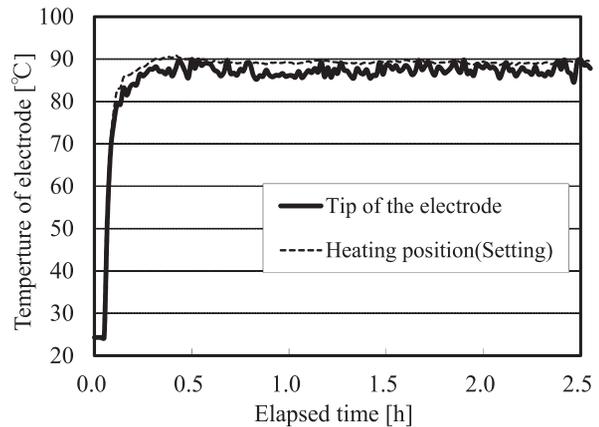


図8 熱電対による電極の温度測定結果
Fig.8 The temperature measurements of the electrode by a thermo couple.

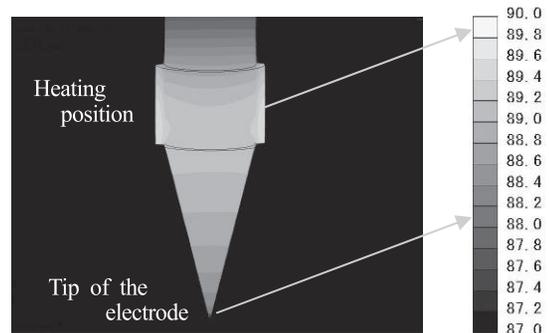


図9 電極先端部温度のシミュレーション結果
Fig.9 The simulation result of electrode tip temperature.

シミュレーション結果を図9に示す。ニクロム線を巻き付けた加熱部が約 90°C の場合、図8に示すように電極先端の直近部分の温度は平均で $87\sim 88^\circ\text{C}$ の間を推移していた。一方、図9のシミュレーション結果では、ニクロム線を巻き付けた加熱部を 90°C に加熱した場合、先端部は約 $88.0\sim 88.2^\circ\text{C}$ となった。これらの結果から、ニクロム線によって電極先端から $3\sim 4 \text{ mm}$ 上部を 90°C に加熱した場合、実際の電極先端部分の温度としては $87\sim 88^\circ\text{C}$ 程度になっていると思われる、ほぼ目標の 90°C に加熱できていることが判った。

次に、イオナイザーAとイオナイザーBの異物の付着状況の比較を示す。初期状態の実態顕微鏡写真を図10に、約 800 hr (33 日間) 運転後の実態顕微鏡写真を図11に示す。図11から、イオナイザーAとイオナイザーBのどちらの電極先端部にもシロキサンが粒子化した SiO_2 と思われる、白い結晶状の異物が見られるが、付着量を比較すると明らかにイオナイザーAの電極の付着量が少ない結果となった。この結果から、電極を 90°C 程度に加熱する実験においても、熱泳動力によって微粒子の付着を低減できる可能性が示唆された。

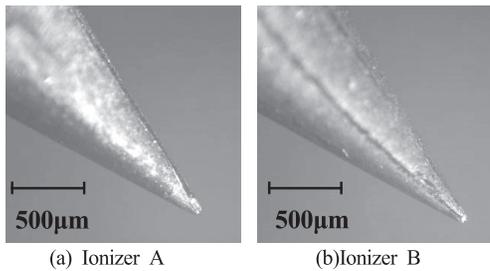


図 10 電極先端部実体顕微鏡写真 (初期状態)
Fig.10 Tip of the electrodes of initial state.

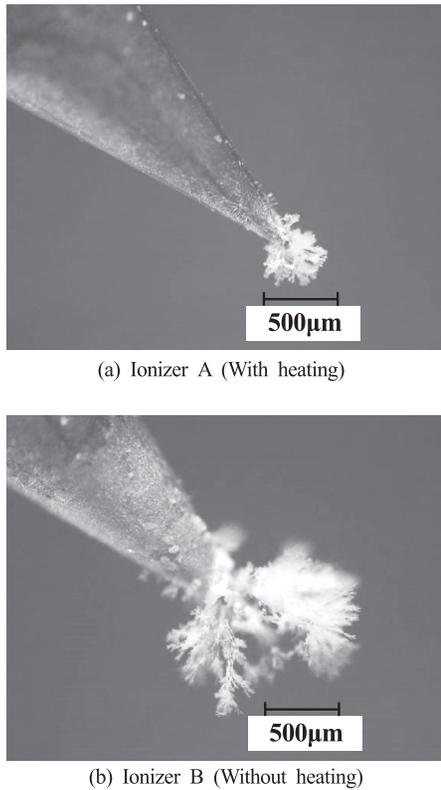


図 11 電極先端部実体顕微鏡写真 (約 800 hr 運転後)
Fig.11 Tip of the electrodes after about 800 hours operation.

4. 実用的な電極の加熱方法の検討

イオナイザー電極を加熱する手段としては様々な方法が考えられるが、今回の実験のようにニクロム線等の電熱線を直接電極に巻き付けて加熱する方法は、実用上では幾つか問題がある。実際のイオナイザーには通常数十本の電極が備わっており、その全てを加熱するための加熱電力 (電源) と、電極への電熱線の巻き付け加工が必要となり大幅なコスト増が予想される。また、電極と電熱線系統が物理的に繋がるため、放電電流が電熱線系統にリークする恐れもある。そこで、電極に抵抗体を組み込み、放電電流がその抵抗体を流れることで発生するジュール加熱によって電極を加熱する、自己発熱型の電極を考案した (図 12)。これにより、加熱用の電源等を付加すること無く電極を加熱することが可能である。表 1

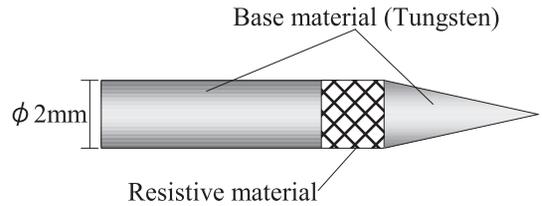


図 12 自己発熱型電極の概形
Fig.12 Form of self-heating electrode.

表 1 電極サンプルの諸元と発熱温度
Table.1 Specifications of electrode samples and temperature.

Sample	Resistive materials	Resistance value ^{*1}	Electrode temperature ^{*2}
 φ2mm×23mmL No.1	ZrO ₂	1.5×10 ¹³ Ω	32.3 °C
 φ2mm×23mmL No.2	ABS	3.5×10 ¹² Ω	33.2 °C
 φ2mm×35mmL No.3	SiC	4.2×10 ⁵ Ω	55.4 °C
 φ2mm×35mmL No.4	SiC	2.4×10 ⁷ Ω	78.1 °C

(*1: 200V Applied *2: Initial temp. 23.3°C)

に 4 種類の自己発熱型電極サンプルについてその諸元、および通電開始 1 hr 後の電極の温度測定結果を示す。なお、電極の初期状態の温度は約 23°C、前項と同様に電極先端の直近部分の温度を極細型の特殊 K 型熱電対を用いて測定し、電極への印加電圧は AC7 kV、交番の周波数は 33 Hz とした。また、電極の抵抗値の測定にはエレクトロメータ (ADVANTEST 製 R8252) を用いた。表 1 から、サンプル No.1 (抵抗体: ZrO₂)、No.2 (抵抗体: ABS 樹脂) の通電開始 1 hr 後の温度は 32°C~33°C で、温度上昇は 10°C 前後、サンプル No.3、No.4 (抵抗体: SiC) の温度は 50°C~80°C であった。No.1、No.2 は、電極の抵抗値が高い (10¹²~10¹³ Ω) ため、十分な放電電流が電極を流れず、発熱しなかったと考えられる。また、電流が流れ難い結果、放電も非常に不安定であった。一方、抵抗体に SiC を用いた No.3 の電極は、抵抗値を 10⁵ Ω 程度まで下げた結果、安定して放電したものの、温度上昇は 30°C 程度であった。No.3 より 2 桁程抵抗値を上げた No.4 の SiC 電極も安定して放電したが、こちらは温度上昇が最も高く、78°C 程度まで上昇した。No.3、No.4 はどちらも十分な放電電流が流れた結果安定して放電したが、抵抗値の大きさで発熱量に差が生じ

たとえられる。一般に、抵抗体を流れる電流で発生するジュール加熱の熱量は (9) 式¹³⁾ で表され、電流 I と抵抗 R がそれぞれ大きいほど発生する熱量は大きくなる。しかし本方式では、放電を妨げず、かつ十分な発熱量が得られるように、電流値と抵抗値を最適にバランスさせることが必要となる。今回評価した電極サンプルの中では、抵抗体に SiC を用い、抵抗値を $10^7 \Omega$ 程度に調整したものが安定して放電し、発熱量も大きかったが、更なる最適化については今後の課題である。

$$Q = I^2 R t = W t \quad (9)$$

Q : 熱量 [J]

I : 抵抗体を流れる電流 [A]

R : 抵抗 [Ω]

t : 時間 [s]

W : 電力 [J/s]

5. まとめ

イオナイザー電極を加熱することで得られる熱泳動力により、電極への異物（微粒子）付着の抑制が可能であるか検討を行った。また、実用的なイオナイザー電極の加熱方法についても併せて検討した。結果を以下に示す。

- ①簡易モデルを用いて、微粒子付着の抑制が可能な熱泳動力を得るための温度勾配を試算した結果、 $0.001 \mu\text{m}$ の粒子では 100°C 程度、 $0.001 \mu\text{m}$ よりも大きな粒子については 100°C 以下の温度差を電極と周囲の空間との間に形成すれば良いことが示された。
- ②イオナイザー電極をニクロム線で 90°C 程度に加熱する実験において、電極を加熱した場合、加熱しない場合に比べ異物付着量が少ない結果が得られた。温度勾配の概算結果も踏まえて、イオナイザー電極への異物付着抑制に対する本方式の有効性を確認した。
- ③実用的なイオナイザー電極の加熱方法として、電極に抵抗体を組み込み、放電電流が流れる際のジュール加熱によって加熱を行う方式を考案した。抵抗体の抵抗値や放電電流値を調整することで、所望の温度への加熱が可能であることが示された。

備考

3.2 節の評価においては、定量評価し得るのに十分な異物付着量ではなく、採取・計量できなかつたため、実体顕微鏡写真を用いた目視による定性評価とした。なお、その後の実験での異物付着量についても、加熱無し > 加熱有りという同様の傾向を確認している。

参考文献

- 1) 並木則和：クリーンルーム環境におけるガス-粒子変換。クリーンテクノロジー, **4** [7] (1994) 67
- 2) 鈴木政典, 鈴木国夫, 田中政史, 山路幸郎：無発塵空気イオン化システムの開発。空気清浄, **26** [5] (1989) 48
- 3) 鈴木佐夜香, 桑名一徳, 土橋律：すすの熱泳動挙動の予測手法に関する研究。日本燃焼学会誌, **52** [159] (2010) 68
- 4) B.Y.H.Liu, B.Fardi, K.H.Ann：Proceeding of 33rd Annual Technical Meeting of the IES, p.461 (May, 1987)
- 5) Sparrow, E.M., G.T.Geiger：Local average heat transfer characteristics for a disk situated perpendicular to a uniform flow. J. Heat Transfer, **107** (1985) 321
- 6) 藤井修二, 謝 国平, 金光映：エアロゾル化学・技術研究討論会論文集, p.28 (1988)
- 7) 阪田総一郎, 池鯉鮒悟, 井上正憲, 吉田隆紀, 岡田孝夫：エアロゾル化学・技術研究討論会論文集, p.36 (1988)
- 8) ウィリアム C. ハイน์ズ：エアロゾルテクノロジー, p.151, 井上書院 (1985)
- 9) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p.37, オーム社 (1981)
- 10) 静電気学会編：静電気ハンドブック, p.172, オーム社 (1981)
- 11) ウィリアム C. ハイน์ズ：エアロゾルテクノロジー, p.149, 井上書院 (1985)
- 12) S.K. フリードランダー：エアロゾルの科学, p.67, 産業図書 (1983)
- 13) 静電気学会編：新版 静電気ハンドブック, p.928, オーム社 (1998)