

熱電冷却を応用した静電霧化装置「ペルチェ式 nanoe システム」

Electrostatic Atomizer Utilizing Thermoelectric Module

小林 健太郎* ・ 秋定 昭輔** ・ 平井 康一** ・ 渡邊 純一*** ・ 宮田 隆弘****
Kentaro Kobayashi Shosuke Akisada Koichi Hirai Jun-ichi Watanabe Takahiro Miyata

熱電素子による熱電冷却効果で空気中の水分を結露させ、その結露水を静電霧化させる方式において、生成結露水量の変動に対して安定した静電霧化を可能とする先端球型霧化電極形状の開発と、温湿度環境の変動に対して生成結露水量を適正に保つための新しい熱電冷却制御方法である放電電流検知式熱電冷却制御システムの開発によって、幅広い温湿度環境下で安定した静電霧化を実現できる静電霧化装置「ペルチェ式 nanoe システム」を実用化した。

本装置は従来の貯水タンク式の静電霧化装置と異なり、水供給が不要で、設置場所の制限も少ないことから、各種機器への搭載が可能となり、さまざまな場所での室内空気環境改善ニーズに幅広く応えることができるものと期待される。

The condensing of atmospheric moisture using the thermoelectric cooling effects of a Peltier element and the static atomization of condensed water has enabled the development of an electrostatic water atomizer with a stable operation under a wide range of climate conditions. This atomizer has a ball-point atomizing electrode shape for stable water mist generation against a varying condensation rate, and a cooling control system based on the detected discharge-current for maintaining an appropriate quantity of condensed water against a varying temperature and humidity environment.

Unlike the conventional water-tank type electrostatic atomizer, this device is expected to satisfy a wider range of needs for improving room air environment because it requires no water supply and has no restrictions regarding its installation location, thereby enabling easy incorporation into various products.

1. ま え が き

近年、健康や快適性に対する関心の高さから、空気浄化技術のニーズが高まっている。その浄化技術の一つで、水に高電圧を印加して帯電微粒子水を発生させる静電霧化技術が注目されている¹⁾。当社では、静電霧化技術を応用した帯電微粒子水「nanoe イオン*¹⁾」発生装置を開発し、これが室内の消臭、花粉抗原の不活化に効果があることを発表してきた^{2), 3), 6)}。

従来の貯水タンク式静電霧化装置は図1に示すように、多孔質セラミックス製の霧化電極と、貯水タンク、対向電極で構成されている。そして、霧化電極先端への水の供給は、毛細管現象によるものである。

従来の装置には、貯水タンクへの水供給の手間が掛かる

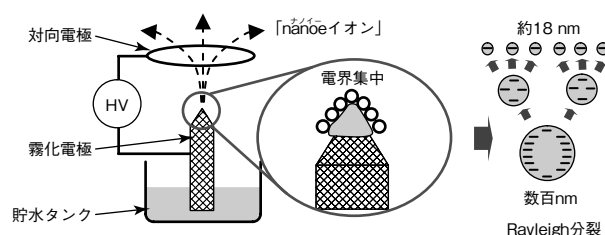


図1 従来の水タンク式静電霧化装置と動作原理

ことや、水供給の必要性から搭載できる機器や設置場所も制限される問題があった。

そこで、筆者らは水供給を不要にするため、熱電冷却によって空気中の水を結露させ、その結露水を静電霧化することにより帯電微粒子水を発生させる装置「ペルチェ式

* 生産技術研究所 Production Engineering Research Laboratory

** 電器事業本部 電器デバイス開発事業部 Device Development Division, Home Appliances Manufacturing Business Unit

*** 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

**** 電器事業本部 電器 R & D センター Research & Development Center, Home Appliances Manufacturing Business Unit

ナノイー システム」を考案した。

熱電冷却を応用するにあたり課題として、①生活環境の温湿度範囲において結露水を生成できる冷却性能の確保、②生成した結露水の安定供給・保持できる霧化電極形状の開発とその放電条件の設定、③温度センサ・湿度センサ・水分センサを使用しない霧化電極温度制御方式の開発が挙げられる。また、従来装置とは水供給方法が異なるため、帯電微粒子水の物性を再評価する必要がある。

本稿では、これらの課題を解決する技術内容、および発生する帯電微粒子水の諸物性評価結果について報告する。

2. 技術課題および解決手段

2.1 冷却能力の確保

ある環境下において結露水を生成させるためには、霧化電極をその環境の露点温度以下にまで冷却する必要がある、使用温湿度範囲に応じた冷却性能が要求される。本節では仕様を満足させるための熱電冷却の設計について述べる。

2.1.1 最大冷却温度目標値の設定

まず、本装置が動作できる、すなわち結露水を生成できる使用環境の目標を温度 $1 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $20 \sim 85\%$ RHとした。なお、露点温度が 0°C 以下の環境については、結露しないため、ここでは考慮しない。

使用温湿度範囲のなかで、もっとも高い霧化電極の冷却能力を要求される環境は 40°C 、 20% RHであり、この環境下で結露水を確保するために必要な冷却性能を検討した。図2は温度に対する飽和水蒸気量曲線で、 40°C 、 20% RHにおける飽和水蒸気量は、図から 10.2 g/m^3 と算出できる。この図から露点温度は約 11°C となり、環境温度 40°C から 29°C 以上霧化電極を冷却できればよい。また、熱電モジュールの設計においては、放熱フィンと霧化電極の温度差 (ΔT) を設定する必要がある。放熱設計目標として、放熱フィンの最大上昇温度を 5°C と設定すると、 ΔT は $40 - 11 + 5 = 34^{\circ}\text{C}$ と計算できるが、特性ばらつきを考慮して目標 ΔT を 40°C と設定した。

2.1.2 熱伝導解析による必要吸熱量の算出

次に、目標 $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ を達成するための必要吸熱量を検討した。装置をモデル化し熱伝導解析によって吸熱量に対する ΔT を計算した結果の一例を図3に示す。同図は $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ が得られるときの解析結果で、このときの必要吸熱量は 0.94 W である。

得られた必要吸熱量から熱電モジュールの仕様を算出して⁴⁾ 装置を試作し、その試作装置の ΔT の評価結果を図4に示す。横軸は熱電モジュールへの入力電流で、縦軸は ΔT を表す。一般に、 ΔT は電流の2次関数で表され、実測値においても ΔT は電流に対して2次関数的に増加し、ピーク付近では $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ である。実測値はねらいの $\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$ とほぼ一致し、目標の冷却性能を達成している。

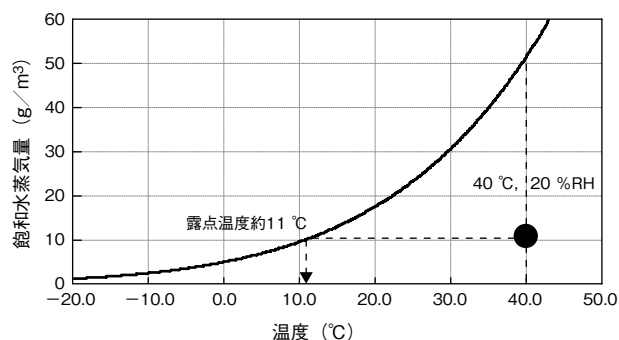


図2 飽和水蒸気量曲線

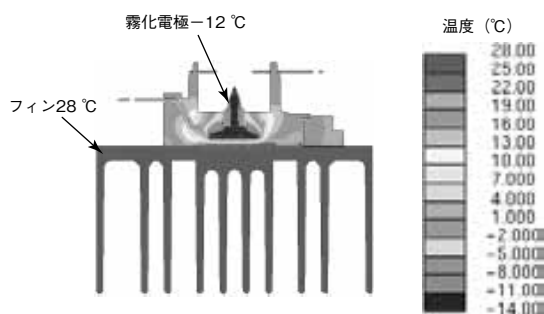


図3 熱伝導解析結果

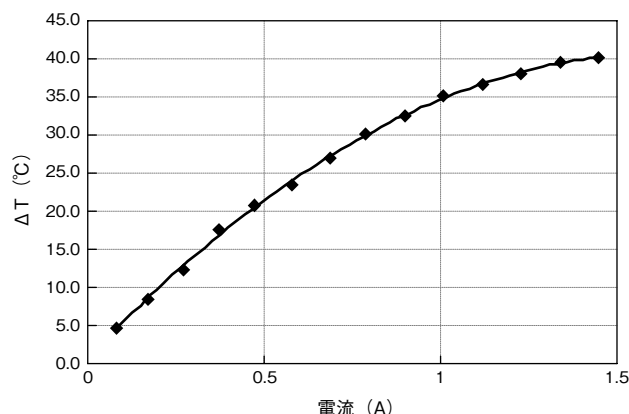


図4 冷却特性評価

2.2 放電部の形状と放電条件

静電霧化を持続させるには、生成した結露水を霧化電極先端部に安定供給・保持することが必要である。また、静電霧化を発生させるためには、霧化電極一対向電極間の距離、対向電極の開口径、印加電圧などの放電条件を適正に設定する必要がある。

本節では結露水を安定供給・保持するための霧化電極形状、および放電条件について述べる。

2.2.1 霧化電極形状の検討

霧化電極設計のポイントは、①効率良く冷却するための高い熱伝導性、②結露水の先端放電部への安定供給とそこで保持する形状などが挙げられる。

まず、①を満足する霧化電極の材質検討では、熱伝導性、

加工性を考慮して黄銅を採用し、さらに耐腐食性を向上させるため、霧化電極表面には金めっき処理を施している。

次に、②の課題を満足させる電極形状の検討では、さまざまな電極形状で静電霧化現象を詳細に観察して霧化安定性を評価した結果、図5のような形状の霧化電極を考案した。この形状においては、球表面で生成した結露水是凝集し、球の表面張力によって霧化電極先端部で保持される。また、くびれ部を設けることによって電極先端への過剰な水の供給を抑制し、適量の供給が可能となる。図6は霧化電極先端における放電の様子である。静電霧化特有のテイラーコーンと呼ばれる円錐状の水柱が形成されており、安定した静電霧化が行われていることがわかる。

この霧化電極形状により、持続性に優れ、かつ安定した静電霧化が可能となる。

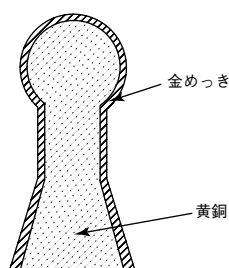


図5 霧化電極先端形状

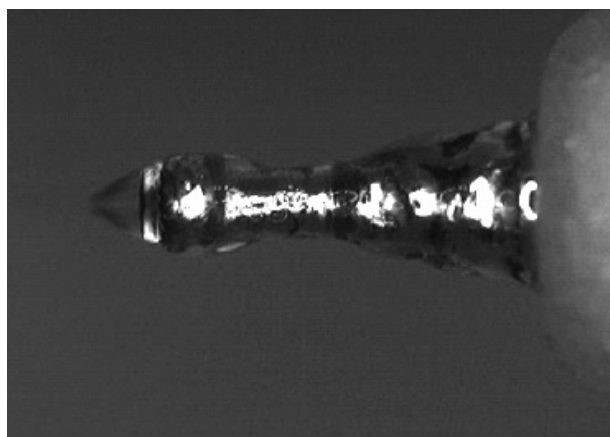


図6 霧化電極先端部放電の様子

2.2.2 放電条件の検討

安定した静電霧化が行われる適正放電条件の設定においては次に挙げる二つの課題解決が必要である。

- ①高電圧印加による放電部の電界強度が適正值より弱いと静電霧化が発生せず、反対に適正值より強いとテイラーコーンがうまく形成されず帯電微粒子水は発生しない。
- ②装置の耐絶縁性の点から、印加電圧は6 kV以下にすることが望ましい。

そこで筆者らは、各放電条件（対向電極の開口径、電極間距離）に対する静電霧化安定性、静電霧化に必要な印加電圧を評価した結果、対向電極の開口径は $\phi 8$ mm、対向

電極－霧化電極間距離は3 mmが最適であることを導きだしている。この検討の一例を図7に示す。この図は対向電極の開口径を $\phi 8$ mmとした場合の電極間距離、印加電圧に対する放電の状態図である。図の点線で囲まれた領域が安定霧化領域にあたり、適正電圧は約4.6～5.3 kVとなる。

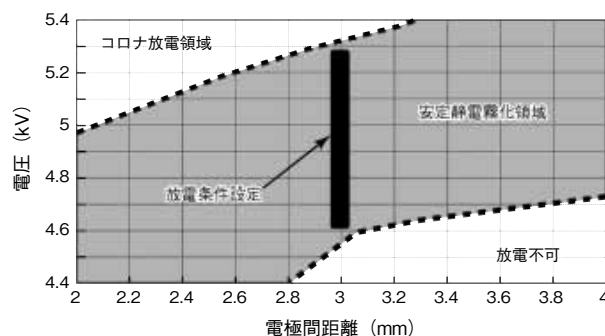


図7 安定静電霧化領域

2.3 熱電冷却制御の開発

前述したように、安定した静電霧化の発生には結露水量を適正に保つ必要があり、それには使用温湿度範囲で変動する露点温度に対して、霧化電極温度をつねにその近傍に保つ必要がある。本節では幅広い環境下に対応できる熱電冷却制御の技術手段について述べる。

2.3.1 熱電モジュール制御手段の検討

熱電冷却による霧化電極温度を制御する手段としては、各種センサを設けて使用環境の温湿度から露点温度を算出し、露点温度と霧化電極温度の差分から熱電モジュールに入力する電圧を制御する方式が考えられる。しかし、一般的な湿度センサでは精度が不十分であることから、この方式では正確な露点温度を設定できない問題が発生した。

そこで筆者らは、生成結露水量と、静電霧化時に発生する放電電流量との間に相関があることを見だし、この相関を利用する制御方法を考案した。

図8に結露水量を変化させたときの放電状態の拡大写真を示す。これによると、結露水量増加とともにテイラーコーンが大きくなり、それとともに放電電流値も増大することがわかる。放電電流値が増大する原因は、テイラーコーンの増大とともに、見かけ上の電極間距離が小さくなるため電界集中が大きくなり、放電が強くなるためと推察される。

図9は、テイラーコーンの大きさから見積もった先端結露水量と、放電電流の相関図である。

この相関関係を利用し、放電電流を検知して、熱電モジュールへの入力電圧をフィードバック制御することにより結露水を安定生成する機構を開発した。

2.3.2 放電電流検知式熱電冷却制御システムの検討

図10に放電電流検知式熱電冷却制御システムの回路ブロック図を示す。静電霧化時に発生する放電電流は対向電

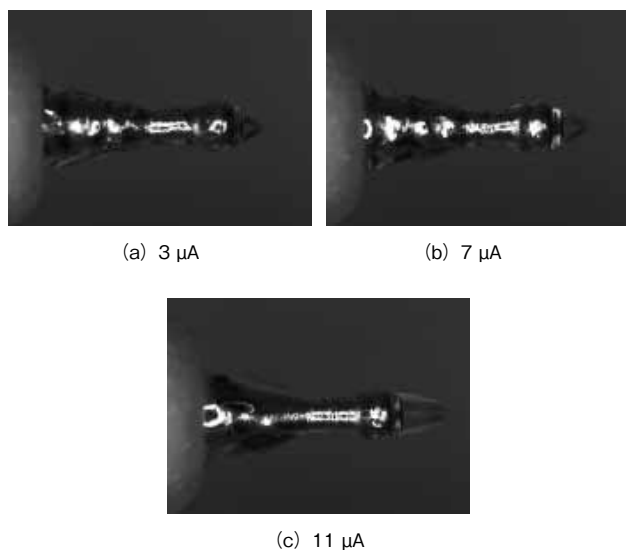


図8 結露水量によるテ일러コーンの変化

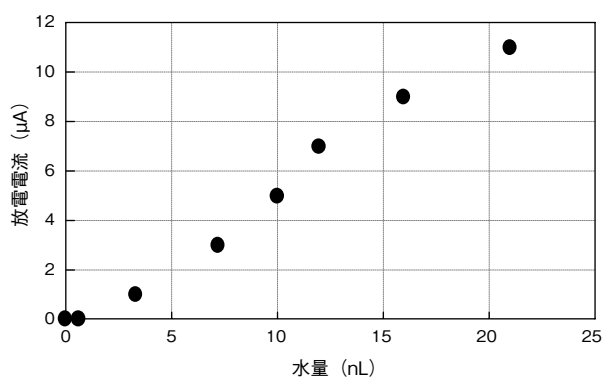


図9 先端結露水量と放電電流の相関

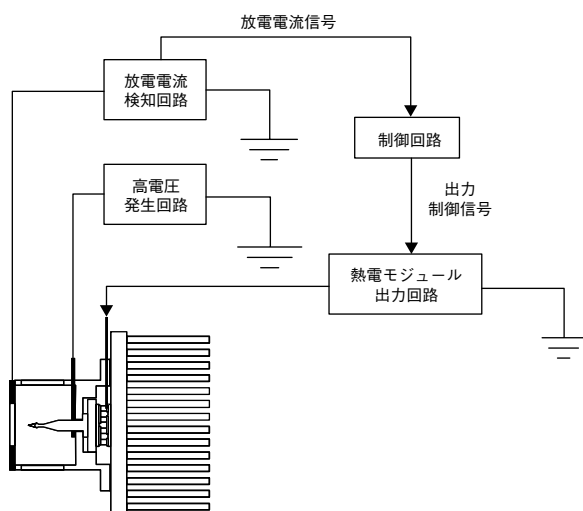


図10 制御回路のブロック図

極を通じて検知回路に流れる。検知回路から発せられた放電電流信号は制御回路に送られ、制御回路は熱電モジュールの出力を制御する。

このシステムを用いて制御定数を最適化した結果、安定

した結露水量の生成と静電霧化の制御が可能となっている。図11に、25℃、50%RHの環境下で動作させたときの、検知した放電電流と制御された熱電モジュールの入力電圧を示す。横軸は経過時間である。図から放電電流が6μA付近で制御できているのがわかる。温湿度を変化させても精度良く追従し、放電電流目標値付近で制御できることを確認している。以上の結果から、本装置は幅広い温湿度環境下で生成結露水量を安定制御できるシステムであることが確認できる。

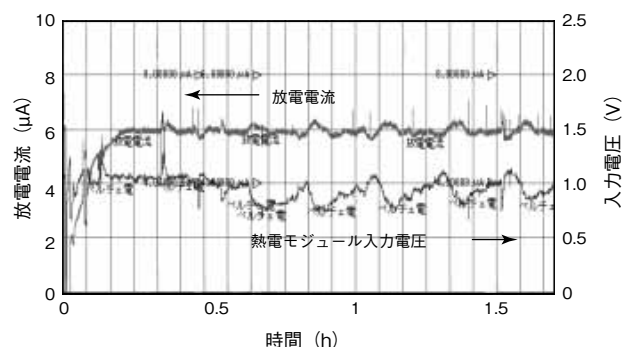


図11 放電電流検知式の制御動作

3. 熱電冷却式静電霧化装置の構成

今回開発した熱電冷却式静電霧化装置の外観写真を図12に、概略図を図13に示す。

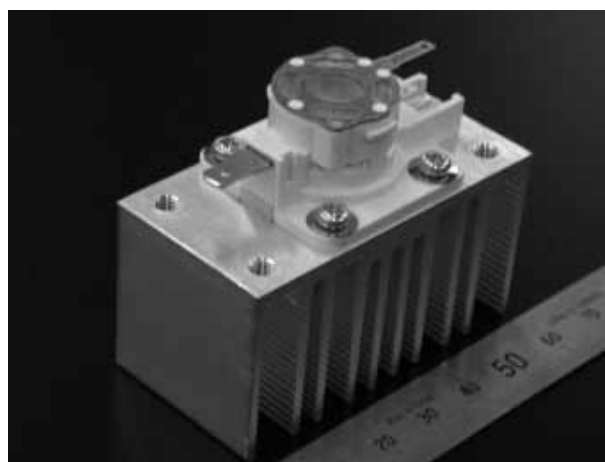


図12 「ペルチェ式nanoeシステム」外観図

熱電モジュールの冷却側には霧化電極を、発熱側には放熱フィンを配置してあり、霧化電極を熱電モジュールにより露点温度以下に冷却することによって、電極表面に結露水を生成する。そして、生成した結露水に高電圧を印加することによって、霧化電極先端の放電部では水が帯電、分裂を起こす。分裂した水は、さらにRayleigh（レイリー）分裂によりナノオーダーまで微細化された帯電微粒子水となり、対向電極からのクーロン力で引き寄せられ、空気中に

4.3 花粉抗原不活化作用

本装置を用いた花粉抗原不活化率評価を行った結果を図16に示す。評価方法は、まず11 Lチャンバ内に花粉抗原を入れたシャーレを設置し、その上に本装置から発生するイオンを2時間直接暴露した後、ELISA法で花粉抗原量を定量化する。なお、不活化率は花粉抗原の残存率（イオン照射後の花粉抗原量／照射前の花粉抗原量）で評価し、比較のために空気負イオンのみの場合も計測している。

図16に示されるように、空気負イオンと、静電霧化による発生イオンとで不活化率に顕著な差がみられる。この原因は、静電霧化により発生したイオンが比較的大きな水

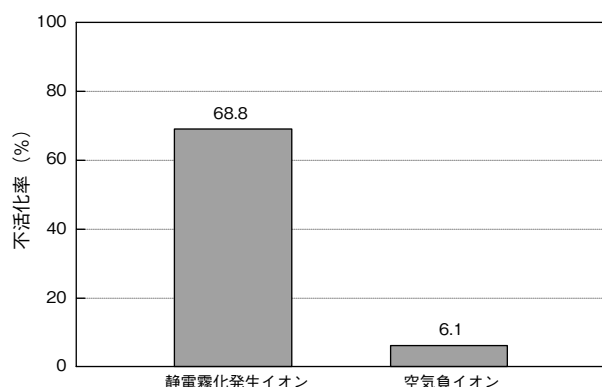


図16 ELISA法による花粉不活化率評価

滴で覆われたイオンであるため、空中浮遊時間が長くなり、不活化率が向上したためと考えられる。

以上の結果から、今回開発した装置による帯電微粒子水の諸物性、および効果効能は従来の貯水タンク式静電霧化装置によるものと差がないことがわかる。

5. あとがき

熱電素子による熱電冷却効果で空気中の水分を結露させ、その結露水を静電霧化させる方式において、生成結露水量の変動に対して安定した静電霧化を可能とする先端球型霧化電極形状の開発と、温湿度環境の変動に対して生成結露水量を適正に保つための新しい熱電冷却制御方式である放電電流検知式冷却制御システムの開発によって、幅広い温湿度環境下で安定した静電霧化を実現できる静電霧化装置「ペルチェ式^{ナノイー}システム」を実用化した。

開発した装置はすでに実用化され、「ナショナル空気清浄機F-PXA28, F-PXA16」に搭載されている。

本装置は、従来の貯水タンク式の静電霧化装置と異なり、水供給が不要で、設置場所の制限も少ないことから、各種機器への搭載が可能となり、さまざまな場所での室内空気環境改善ニーズに幅広く対応できるものと期待される。

●注

* 1) ^{ナノイー}nanoe：当社登録商標

*参考文献

- 1) K. Okuyama：エアロゾル研究, 13, 83 (1998)
- 2) N. Iwamoto, H. Suda, Y. Matsui, T. Yamauchi, K. Okuyama：エアロゾル科学・技術研究討論会, p. 59-60 (2003)
- 3) H. Suda, N. Iwamoto, Y. Matsui, T. Yamauchi, K. Okuyama：静電気学会講演論文集, p. 237-238 (2003)
- 4) 上村 欣一, 西田 勲夫：熱電半導体とその応用, 日刊工業新聞社 (1988)
- 5) 下影 卓二, 才本 雅子, 奥本 佐登志, 宮田 隆弘, 山内 俊幸：静電霧化による微粒子水の成分分析法, 松下電工技報, Vol. 53, No 4, p. 11-16 (2005)
- 6) 須田 洋, 中田 隆行, 小豆沢 茂和, 田中 友規, 山口 友宏, 山内 俊幸：静電霧化技術応用空気清浄機の付着臭除去とアレルギー不活化効果, 松下電工技報, Vol. 53, No. 3, p. 16-19 (2005)

◆執筆者紹介



小林 健太郎
生産技術研究所



秋定 昭輔
電器デバイス開発事業部



平井 康一
電器デバイス開発事業部



渡邊 純一
先行技術開発研究所



宮田 隆弘
電器R&Dセンター