

## 論 文

## イオン搬送式イオナイザーの開発

—超音波を用いた静電霧化による粗大荷電粒子の生成—

鈴木政典\*, 佐藤朋且\*\*, 松橋秀明\*\*, 水野彰\*\*\*

(2003年9月11日受付; 2003年12月16日受理)

## Development of Ion Conveying Type Ionization System

—Generation of Large Charged Particles by Ultrasonic/Electrostatic Atomization—

Masanori SUZUKI\*, Tomokatsu SATO\*\*, Hideaki MATSUHASHI\*\*, Akira MIZUNO\*\*\*

(Received September 11, 2003; Accepted December 16, 2003)

In recent years, we have conducted the development of ionization system conveying ions through tubes, in order to control static electricity in narrow space such as space in ULSI and LCD manufacturing equipments.

In the previous paper, we reported the results of evaluation in terms of the influence of several factors on charge eliminating performance of the ionization system generating charged fine mists (large charged particles) by electrostatic atomization. However, this ionization system could not generate charged fine mists stably in closed narrow space. Therefore, we have developed a new ionization system generating charged fine mists by ultrasonic/electrostatic atomization. We reported the results of evaluation in terms of the influence of several factors on charge eliminating performance of this new ionization system.

In this paper, we will report the results of investigation for optimizing charge eliminating performance of this new ionization system, based on characteristics of electrostatic atomization by using ultrasonic.

## 1. はじめに

近年、半導体、液晶製造等の生産装置内の狭いスペースでの静電気対策を目的として、正負のイオンを細いチューブでユースポイントまで搬送し、帯電体を除電するタイプのイオナイザー（イオン搬送式イオナイザー）の開発を行ってきた<sup>1,2)</sup>。しかし、静電拡散によるイオンのチューブ内壁への付着や、イオンの再結合により、イオン量が急速に減少することが問題になっていた。

そこで、冷却等で微細ミストを発生させ、それに軟X線等で発生させた正負イオンを付着させる方法で、イオン（微小荷電粒子）を粗大化し、粗大荷電粒子にすることにより、イ

オンの電気的移動度を小さくして、搬送距離を改善する除電システム（荷電粒子搬送式イオナイザー）を考案し、その効果を実験により確認した<sup>3)</sup>が、システムが複雑で高価という問題があった。

この問題を改善するため、微細ミスト生成と荷電を同時に行う粗大荷電粒子生成方法として、液滴に高電圧を印加して微細ミストを生成する静電霧化現象を応用した除電システムについて検討した<sup>3)</sup>。しかし、この方法は閉所での静電霧化が不安定であり、粗大荷電粒子を安定に効率良く生成することが困難であった。

このため、より安定で効率の良い荷電粒子発生方法として、超音波を用いた静電霧化による荷電粒子搬送式イオナイザーを考案し、①霧化用印加電圧、②誘導電極の面積、③誘導電極の設置位置、④霧化用純水の導電率、⑤荷電粒子搬送エア風量、⑥霧化用純水に直接電圧を印加した場合、等の要因がイオナイザーの除電性能に与える影響について評価した<sup>4)</sup>。

本論文では、これらの結果を踏まえて、①超音波を用いた静電霧化の特性の調査と、②その特性に従って、超音波を用いた静電霧化による荷電粒子搬送式イオナイザーの除電性能を最適化するための検討とを行ったので、その結果について報告する。尚、イオン（微小荷電粒子）を粗大化し、イオ

キーワード：イオナイザー、静電霧化、超音波、イオン搬送

\* 豊橋技術科学大学 エコロジー工学系 (441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1) Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi, 441-8580, Japan

\*\* (株) テクノ菱和 技術開発研究所 (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

\*\*\*岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 (444-8585 愛知県岡崎市明大寺町西郷中 38) Okazaki National Institutes, Institute for Molecular Science, Saigo-naka38, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585, Japan

ンの電気的移動度を小さくすることにより、搬送距離を飛躍的に改善できることは、すでに確認済みであるため<sup>2)</sup>、本論文では、搬送チューブ長さを一定として除電性能を最適化するための検討を行った。

## 2. 実験装置及び測定方法

本荷電粒子搬送式イオナイザーの除電性能を測定するための実験装置を図1に示す。超音波振動子(発振周波数 2.4MHz, DC-24V/550mA, 18mm φ)を底部に2個または3個(図1は、2個の場合を示している。)取り付けた荷電粒子生成チャンバー(チャンバー内筒の内寸: 150mm φ × 190mmH)に水(水位 25~35mm)を入れ、超音波により水を霧化する。水に超音波振動子により振動を与えると、指向性を持った音の放射圧により液柱(およそ 5mm φ × 60mmL)が立ち上り、その液柱表面に表面波(キャピラリーワーク)が発生し、それによる水の衝突・引きちぎり合う力が水の表面張力に打ち勝って水を微粒化し、微細ミストが生成する<sup>3)</sup>(図3)。微細ミストに誘導荷電を行う場合は、チャンバー内に、図2に示すように平板状誘導電極タイプA(110mm × 60mmH 1枚)またはB(110mm × 60mmH 2枚)を設置し、それに交流高電圧(0~

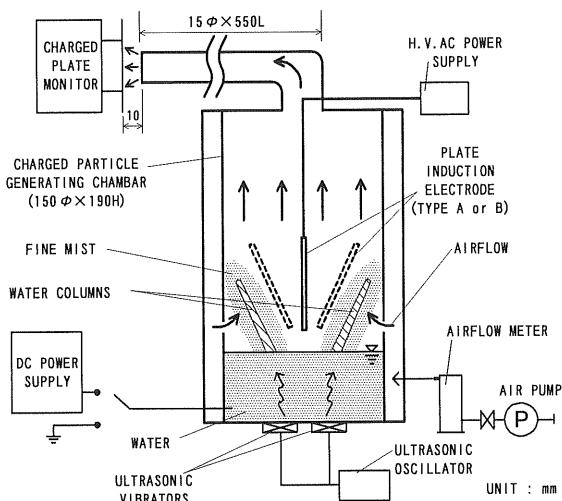


図1 新イオナイザーの除電性能を評価するための実験装置  
Fig.1 Experimental setup for measurement of charge eliminating performance of the new ionization system.

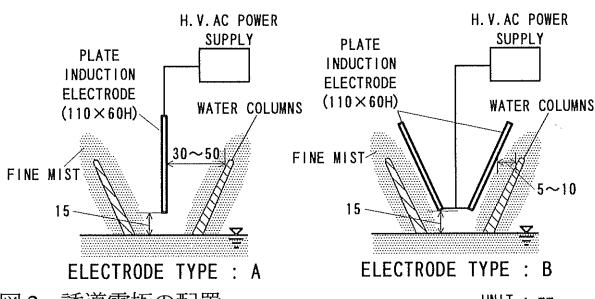


図2 誘導電極の配置  
Fig.2 Arrangement of the induction electrode.

6kV)を印加する。これにより、超音波により液柱表面から水が引きちぎれる際に、誘導により荷電され、帶電した微細ミスト(粗大荷電粒子)が生成する。

生成した粗大荷電粒子は、エアポンプで荷電粒子生成チャンバーに送られ、チャンバー内筒下部の周囲に均等に配置された開口(3.5mm φ × 約 20mm ピッチ × 23 個)より給気されるエアにより、チャンバー外へ搬送され、チューブ(内径 15mm φ × 550mmL)を通じて除電性能評価用の帶電プレートモニタ(金属プレート)に吹付けられる。

除電性能は、帶電プレートモニタ(ISI 製 CPM210)の金属プレート(15.2 × 15.2cm, 20pF ± 2pF)を1kV(または-1kV)に帶電させ、その初期電位が搬送された荷電粒子により十分の一の0.1kV(または-0.1kV)まで減衰する時間(Voltage decay time, 電位減衰時間、すなわち除電時間)により評価する。除電時間は短いほど、除電性能が優れていることを示している。金属プレートを正極性に帶電させた場合は、負極性荷電粒子による除電性能を、負極性の場合は、正極性荷電粒子による除電性能を評価したことを示している。

## 3. 測定結果及び考察

### 3.1 超音波を用いた静電霧化の特性

図4に、水の導電率の除電性能への影響を示す。導電率の測定には、導電率計 Iuchi 製 CyberScan CON300 を使用した。

導電率が 1~2 μS/cm 以下になると、誘導電極へ印加する交流高電圧の有無及び大小(0, 3.5, 6.0kV)によらず、負の荷電粒子による除電時間はほぼ同じ値(5秒)となっている(図4-(a))。そして、正の荷電粒子による除電時間は 2 μS/cm 以下になると急速に長くなり、除電性能が著しく低下している(図4-(b))。また、印加電圧が 0kV の場合、導電率が 30~50 μS/cm 付近で正と負の荷電粒子による除電性能が共に急速に低下している。従って、1~2 μS/cm 以下の導電率の領

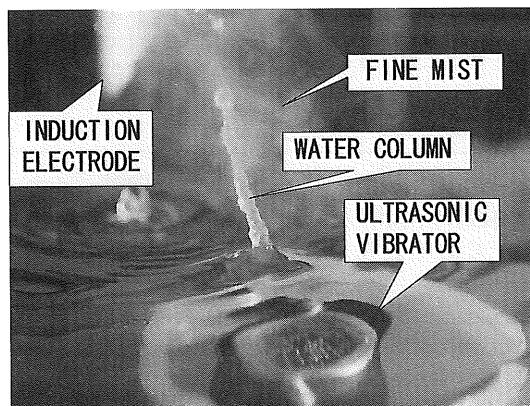
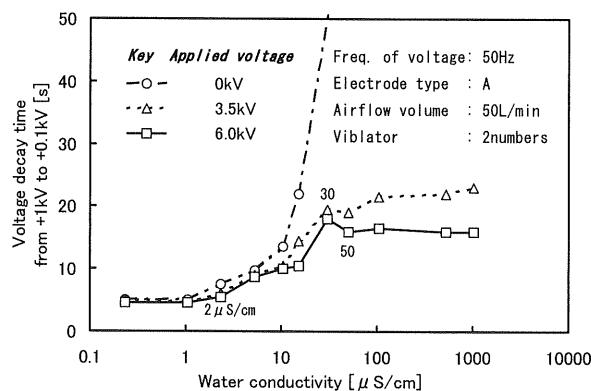


図3 超音波を用いた静電霧化  
Fig.3 Ultrasonic / electrostatic atomization.

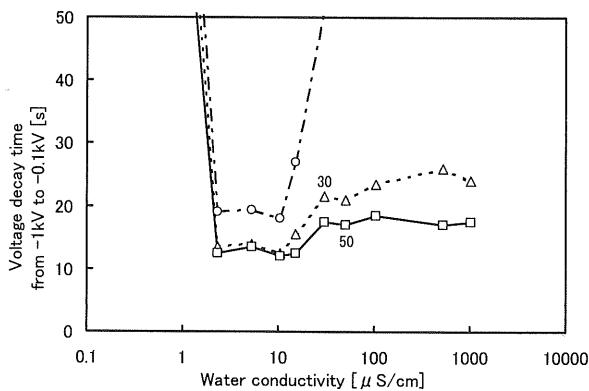
域では、生成される微細ミストの誘導による荷電はほとんど行われず、水の分裂により荷電粒子が生成されている。そして、この領域では、負の荷電粒子の生成量が著しく多い。また、この水の分裂による荷電粒子の生成は、 $30\sim50 \mu\text{S}/\text{cm}$  附近でほぼ失われる。

印加電圧が 3.5, 6.0kV の場合は、導電率の増加に伴って、除電性能は低下し、導電率が  $30\sim50 \mu\text{S}/\text{cm}$  附近からほぼ一定になっている。そして、この領域では、正と負の荷電粒子による除電時間はほぼ同じ（すなわち、正と負の荷電粒子量がほぼ同じことを示している。）で、印加電圧が高くなると除電時間が短くなっている。従って、この  $30\sim50 \mu\text{S}/\text{cm}$  以上の領域では、誘導荷電が支配的である。

すなわち、超音波を用いた静電霧化は、水の導電率により、荷電粒子の支配的な生成機構が異なる。1~2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以下では、水の分裂による荷電粒子の生成が支配的で、 $30\sim50 \mu\text{S}/\text{cm}$  以上では、誘導による荷電粒子の生成が支配的になる。水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な領域では、水の導電率が小さく、微細ミストの生成に電荷の供給が追いつかないため、誘導により荷電粒子を生成することは困難である。



(a) With negative charged particles



(b) With positive charged particles

図 4 正または負の荷電粒子による除電性能への水の導電率の影響

Fig.4 Influence of water conductivity on the voltage decay time with positive and negative charged particles.

### 3.2 除電性能の最適化の検討

#### 3.2.1 水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な場合

##### 3.2.1.1 超音波振動子個数の検討

超音波振動子個数の除電性能への影響を図 5 に示す。振動子個数の増加に伴って、リニヤではないが、除電時間が短くなり、除電性能が向上している。

水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な導電率の領域 ( $1\sim2 \mu\text{S}/\text{cm}$  以下) だけに限らず、振動子個数の増加は、微細ミストの生成量そのものを増加させることになり、確実に除電性能を向上させる方法として、有効と思われる。

##### 3.2.1.2 荷電粒子搬送気流速度の検討

搬送エア風量の除電性能（除電時間）への影響を図 6 に示す。風量の増加と共に、除電時間が短くなり、除電性能が良くなるが、エア風量がおよそ  $100\text{L}/\text{min}$  以上になると、逆に除電性能が悪くなっている。これは、風量がおよそ  $100\text{L}/\text{min}$  以上、すなわち荷電粒子生成チャンバー内筒内の搬送気流速度（液柱周囲の搬送気流速度）がおよそ  $0.095\text{m}/\text{s}$  以上になると、搬送気流が超音波によって発生する液柱や液柱表面の表面波の形成を妨害し、その結果微細ミストの生成量そのも

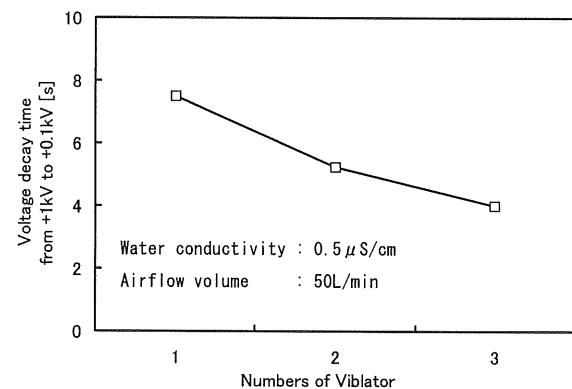


図 5 負の荷電粒子による除電性能への振動子個数の影響

Fig.5 Influence of numbers of the ultrasonic vibrator on the voltage decay time with negative charged particles.

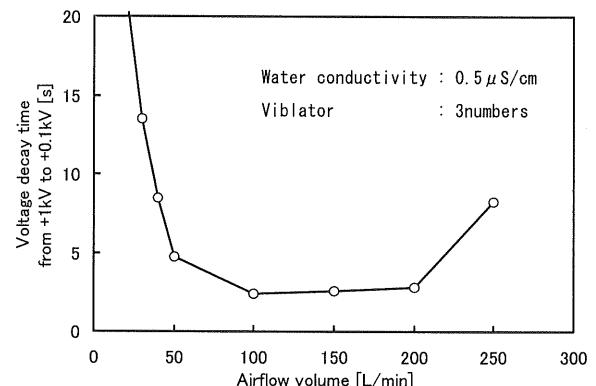


図 6 負の荷電粒子による除電性能への搬送エア風量の影響

Fig.6 Influence of the airflow volume on the voltage decay time with negative charged particles.

のが減少したものと思われる。

水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な導電率の領域だけに限らず、微細ミストの生成は、液柱周囲の搬送気流速度の影響を強く受ける。本論文で用いた超音波振動子では、およそ  $0.095\text{m/s}$  が最適であると思われる。従って、除電性能を向上させるためには、荷電粒子の最適な搬送気流速度を維持しつつ、チャンバーの断面積を大きくする等により搬送エア風量を増やすことが考えられる。

### 3.2.1.3 正負荷電粒子量のバランス制御の検討

水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な導電率の領域 ( $1\sim 2\mu\text{S/cm}$  以下) では、負の荷電粒子が正の荷電粒子に比べ、著しく多く生成する(図4)。生成量が偏った正負荷電粒子により、静電気を除電(中和)することは困難である。そこで、霧化用の水に、直接正の直流電圧を印加して、正極性荷電粒子の生成を促進し、正負荷電粒子量のバランスを制御することを検討した。しかし、導電率が  $2\mu\text{S/cm}$  以下では、正負の荷電粒子量をバランスさせるための水への印加電圧が高電圧になり、超音波振動子の耐電圧(およそ  $4\text{kV}$ )を超える恐れがあったため、正負荷電粒子量のバランスを制御することは困難であった。

図4から分かるように、導電率が  $2\sim 10\mu\text{S/cm}$  の領域では、正と負の荷電粒子による除電時間の差(言換えると、正と負の荷電粒子量の差)が比較的小ないので、この領域で正負荷電粒子量のバランスを制御することを行った。その結果を図7に示す。水への印加電圧が高くなると、正極性荷電粒子による除電時間が短く、負極性荷電粒子による除電時間が長くなっている、水への印加電圧が+2500V付近で逆転している。これにより、 $2\sim 10\mu\text{S/cm}$  の領域において、生成する正負の荷電粒子量のバランスを制御できることが分かる。また、図4より  $10\mu\text{S/cm}$  以上になると、正と負の荷電粒子による除電時間(言換えると、正と負の荷電粒子量)はほぼ同じになり、制御を必要としない。

従って、 $1\sim 2\mu\text{S/cm}$  以下においては、正負荷電粒子量のバランスを制御することは困難であり、 $2\sim 10\mu\text{S/cm}$  が最適である。

### 3.2.2 誘導による荷電粒子の生成が支配的な場合

#### 3.2.2.1 誘導電極への印加電圧と電極配置の検討

図8は、平板状の誘導電極タイプA( $110\text{mm}\times 60\text{mmH}$  1枚)またはB( $110\text{mm}\times 60\text{mmH}$  2枚)を図2に示すように配置し、それに交流高電圧( $0\sim 6\text{kV}$ )を印加した場合の除電性能への影響を示している。タイプA、Bの電極配置とも、印加電圧が高くなるに伴い、除電時間は短くなる。また、タイプBの電極配置の方が、タイプAに比べより除電時間が短

くなり、除電性能が向上することが分かる。ただし、導電率が小さい場合は、その影響は小さい。

誘導荷電が支配的な領域では、誘導電圧を高くし、誘導電極を液柱に近づけて、液柱周りの電界強度を高めることにより、除電性能を向上させることができることが分かる。

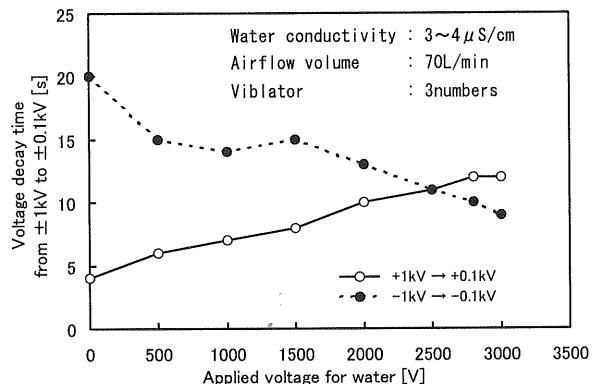
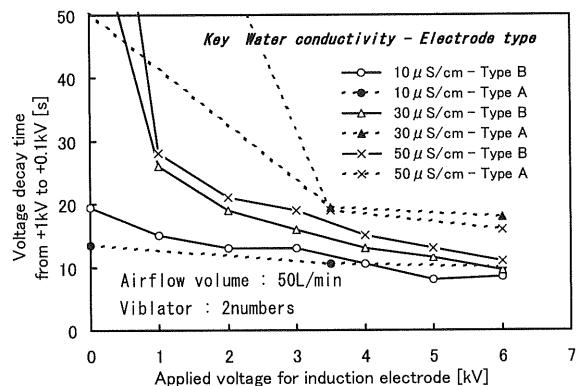
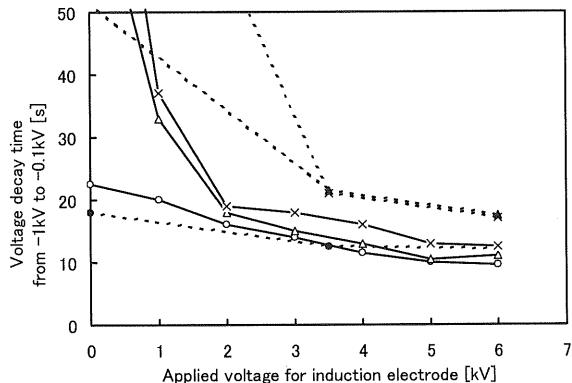


図7 霧化用の水への印加電圧の除電性能への影響

Fig.7 Influence of the applied voltage for atomizing water on the voltage decay time.



(a) With negative charged particles



(b) With positive charged particles

図8 正または負の荷電粒子による除電性能への印加電圧の影響

Fig.8 Influence of the applied voltage on the voltage decay time with positive and negative charged particles.

### 3.2.2.2 誘導電圧の周波数の検討

図9は、誘導電極に印加する交流高電圧の周波数の除電性能への影響を示している。任意の周波数の交流高電圧を発生するために、Trek 製 高電圧アンプ Model 10/10B とファンクションジェネレータ Model FG-2A を使用した。

周波数が 50Hz 以下になると、除電時間が長くなり、除電性能が低下している。その影響は導電率が大きくなるほど顕著になる傾向がある（図9-(a)）。また、導電率を一定にして、誘導電圧と搬送エア風量を変えた場合も、図9-(a)と同様に、周波数が 50Hz 以下になると、除電時間が長くなり、除電性能が低下している（図9-(b)）。

これは、周波数が小さくなるに伴い、半波長の印加時間が長くなり、生成した荷電粒子は荷電粒子生成チャンバーから搬送される前に誘導電極に付着し、消費されてしまうためと考えられる。

誘導荷電が支配的な領域では、誘導電極に印加する交流高電圧の周波数は、荷電粒子生成チャンバーの構造、誘導電圧と搬送エア風量により異なるが、有効な値が存在し、本論文の実験装置と条件では 50Hz 以上が必要である。

### 3.2.2.3 荷電粒子搬送気流速度の検討

搬送エア風量の除電性能（除電時間）への影響を図10 に示す。風量の増加と共に、除電時間が短くなり、除電性能が良くなるが、エア風量がおよそ 100L/min 以上になると、逆に除電性能が悪くなっている。これは、水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な場合と同様に、超音波により生成する液柱の周囲の搬送気流速度が、およそ 0.095m/s 以上になると、液柱や液柱表面の表面波の形成を妨害し、その結果微細ミストの生成量そのものが減少したものと思われる。

水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な場合と同様に、誘導荷電が支配的な場合においても、微細ミストの生成は、液柱周囲の搬送気流速度の影響を強く受ける。この場合も、およそ 0.095m/s が最適であると思われる。従って、除電性能を向上させるためには、1~2 μS/cm 以下の場合と同様に、荷電粒子の最適な搬送気流速度を維持しつつ、搬送エア風量を増やすことが考えられる。

## 4. まとめ

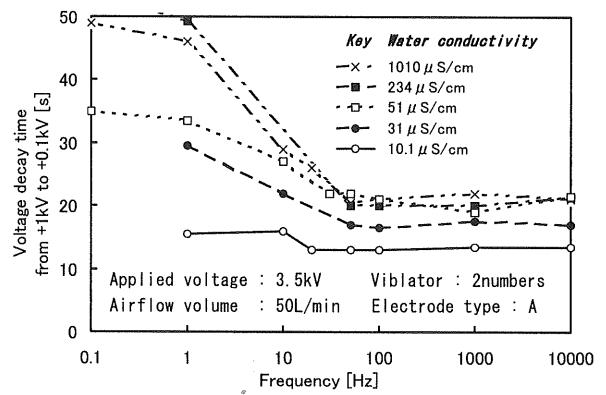
超音波を用いた静電霧化による荷電粒子搬送式イオナイザーを開発するに当たり、超音波を用いた静電霧化の特性を調査し、その特性に従って、このイオナイザーの除電性能を最適化するための検討を行った。その検討結果を以下に示す。

### 4.1 超音波を用いた静電霧化の特性

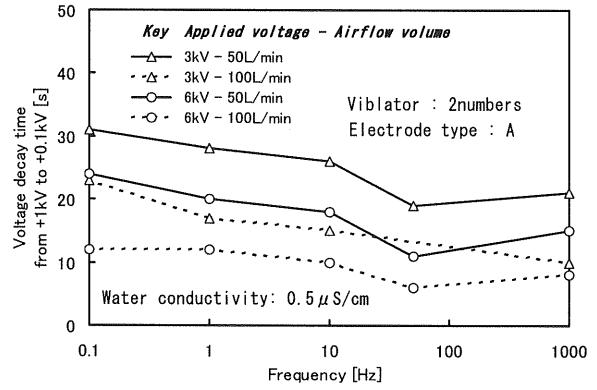
超音波を用いた静電霧化は、水の導電率により、荷電粒子の支配的な生成機構が異なる。1~2 μS/cm 以下では、水の分

裂による荷電粒子の生成が支配的で、30~50 μS/cm 以上では、誘導による荷電粒子の生成が支配的になる。

1~2 μS/cm 以下では、水の分裂により負の荷電粒子が正の荷電粒子に比べ著しく多く生成する。そして、この現象は、



(a) On water conductivity



(b) On applied voltage and airflow volume

図9 負の荷電粒子による除電性能への誘導電圧の周波数の影響

Fig.9 Influence of frequency of the applied voltage to induction electrode on the voltage decay time with negative charged particles.

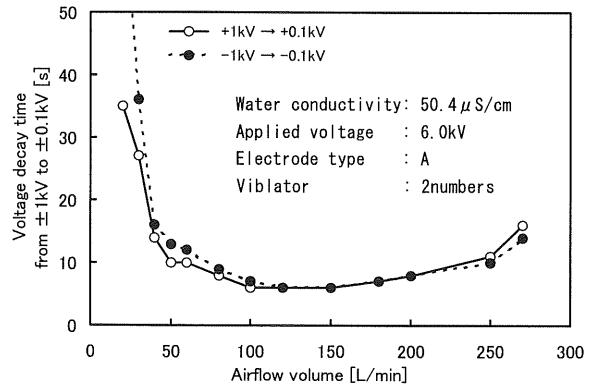


図10 搬送エア風量の除電性能への影響

Fig.10 Influence of airflow volume on the voltage decay time.

30~50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  付近で急速に失われる。この導電率が著しく小さな領域では、誘導により荷電粒子を生成することは困難である。

30~50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以上では、導電率により除電性能はあまり変化しない。そして、この導電率の領域では、正と負の荷電粒子による除電性能はほぼ同じで、誘導電圧を高くすることにより、除電性能を向上させることが可能である。

#### 4.2 水の分裂による荷電粒子の生成が支配的な場合の除電性能の最適化

1~2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以下において、除電性能を向上させ、最適化する方法として、①超音波振動子の個数を増やして、微細ミストの生成量そのものを増加させる、②荷電粒子の最適な搬送気流速度を維持しつつ、荷電粒子生成チャンバーの断面積を大きくする等により搬送エア風量を増やすこと、が考えられる。また、正負荷電粒子量のバランスを制御するためには、水の導電率は2~10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  が最適である。

#### 4.3 誘導による荷電粒子の生成が支配的な場合の除電性能の最適化

30~50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以上において、除電性能を向上させ、最適化する方法として、①液柱周りの電界強度を高めることにより、除電性能を向上させる、②誘導電極に印加する交流高電圧の周波数を、荷電粒子生成チャンバーの構造、誘導電圧と搬送エア風量を考慮して最適化する、③1~2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  以下の場合と同様に、振動子個数を増やすこと、また荷電粒子の最適な搬送気流速度を維持しつつ、搬送エア風量を増やすこと、が考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鈴木政典, 金丸巧, 鈴木国夫, 杉田章夫: 第16回空気清浄とコンタミネーション研究大会予稿集, p.119(1998)
- 2) 鈴木政典, 和泉貴晴, 鈴木国夫, 杉田章夫: 第17回空気清浄とコンタミネーション研究大会予稿集, p.298(1999)
- 3) 鈴木政典, 佐藤朋且, 杉田章夫: 第19回空気清浄とコンタミネーション研究大会予稿集, p.73(2001)
- 4) 鈴木政典, 佐藤朋且, 海老根猛, 杉田章夫: 静電気学会講演論文集'02, p.205(2002.8)
- 5) 日本電子機械工業会編: 超音波工学, pp.265-273, コロナ社 (1999)