

# 多孔板遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの除電性能の評価

佐藤 朋且<sup>\*1</sup>, 鈴木 政典<sup>\*</sup>, 水野 彰<sup>\*\*</sup>

(2012年1月31日受付; 2012年4月13日受理)

## Evaluation of Charge Eliminating Performance of the Soft X-ray Ionizer with the Shielding Structure Consisting of a Perforated Plate

Tomokatsu SATO,<sup>\*1</sup> Masanori SUZUKI<sup>\*</sup> and Akira MIZUNO<sup>\*\*</sup>

(Received January 31, 2012; Accepted April 13, 2012)

Recently, ionizers employing low energy X-rays of 3 to 9.5 keV have been used in semiconductor industries, LCD manufacturing processes and pharmaceutical processes. However, when these ionizers are installed in manufacturing equipment, the equipment must be covered with shielding panels to shield the soft X-ray. In addition, this equipment requires safety measures to stop ionizers automatically when a worker entered a shielding area by any chance. For those reasons, the X-ray ionizers have been inconvenient for practical use. Therefore we have been developing a soft X-ray ionizer with shielding structure. In the previous paper, we reported the results of investigation on performance of the shielding structure consisting of small metal pipes. In this paper, we report the results of investigation on the influence of the supply air volume and air inlet position at the ion generating chamber with the shielding structure consisting of a perforated plate, for optimizing charge eliminating performance of this ionizer.

### 1. はじめに

近年、半導体や液晶製造、また医薬品製造のクリーンルームにおいて、除電性能に優れ、無発塵であることから、エネルギーが3-9.5 keV (ピーク 約6 keV) の低エネルギーX線(軟X線)をイオン化源とするイオナイザーが利用されるようになった。しかし、生産ラインでこのイオナイザーを使用する場合には、軟X線を遮蔽するため生産装置を遮蔽板で区画し、万一作業者が立ち入った場合でも軟X線照射が自動停止するインターロック対策が必要で、取扱いが比較的不便であった。そこで、イオナイザー自体から発塵や軟X線の漏れが無く、遮蔽の必要が無いイオナイザーを考案した。このイオナイザーでは、チャンバー内で軟X線照射により正負の空気イオンを生成し、これらのイオンを取り出して除電に利用する。このため、正負の空気イオンは通過するが軟X線は遮蔽するような構造体が必要となる。既報<sup>1,2)</sup>では、図1に示すように、イオン化したエアーの吹出部を、小孔径の金属パイ

プから成る遮蔽構造としたイオナイザーについて検討し、軟X線の漏洩線量率を1 μSv/hr以下にでき、かつ、正負の空気イオンが十分に通過することを確認した。本報では、この金属パイプによる遮蔽原理を応用し、金属パイプと同様の遮蔽効果を有する、厚みを持った多孔板状の吹出部を設計し、このイオナイザーの除電性能を最適化することを目的として、供給エアー量、イオン化チャンパー内の気流性状等が除電性能に与える影響を調査したので、その結果を報告する。

### 2. 遮蔽構造を持つ軟X線イオナイザーの概要

図2に今回検討したイオナイザーの概略図を示す。このイオナイザーは、角筒状のチャンパー内を軟X線でイオン化し、発生させた正負の空気イオンを除電箇所に吹付けるものである。イオン化エアー吹出部は、小孔を配列した1枚の厚みを持った多孔板状の構造で、この孔径および板厚によって空気イオンは通すが、軟X線は遮蔽する構造になっている。多孔板構造としたことで、金属パイプによる遮蔽構造と同様の遮蔽効果を有しながら、構造がシンプルで製作が容易になり、製作コストの低減も実現している。このイオナイザーの主な特徴を以下に示す。

- (1)イオナイザー自体が軟X線の遮蔽構造で、設置の際遮蔽の必要が無い。
- (2)無発塵で、かつ、オゾンの発生が無い。
- (3)軟X線ヘッドの交換だけで、他のメンテナンスは不要。

キーワード：クリーンルーム、イオナイザー、除電性能  
軟X線、遮蔽構造

\* 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 Hibirigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

<sup>1</sup> t\_satou@techno-ryowa.co.jp

3. 実験装置および評価方法

軟 X 線の線量率が 1 μSv/hr 以下に遮蔽するための、多孔板の孔径および板厚は、既報<sup>1,2)</sup>の金属パイプによる遮蔽性能の検討結果を用いて以下のように設計した。図 3 の、軟 X 線管を収めた遮蔽筒にパイプを打込んだ実験装置において、軟 X 線源から照射された軟 X 線は、一部が打込んだパイプ内を透過して、パイプの外部まで到達する。軟 X 線源から任意の距離における軟 X 線の線量率を、パイプ透過前の入射線量率  $I_{inlet}$ 、パイプを透過して外部に到達した線量率を透過線量率  $I_{outlet}$  とすると、透過率は  $P = I_{outlet} / I_{inlet}$  で表され、透過線量率  $I_{outlet}$  が常に 1 μSv/h 以下となるような透過率のパイプを選定する。軟 X 線源から任意の距離における入射線量率  $I_{inlet}$  は、既報<sup>3)</sup>で求めた、軟 X 線源から任意の距離  $X$  における空気中の軟 X 線線量率  $I_X$  の近似式 (1) を用いて計算する。

$$I_X = 4.0 \times 10^6 e^{-0.0055X} \text{ [}\mu\text{Sv/h]} \quad (1)$$

また、透過線量率  $I_{outlet}$  が 1 μSv/hr となる透過率を  $P_1$  とすると、 $P_1$  は以下の式 (2) のように求められる。

$$P_1 = I_{outlet} / I_{inlet} = 1 / I_X = 0.25 \times 10^{-6} e^{0.0055X} \text{ (} X \leq 740 \text{ mm)} \quad (2)$$

一方、既報<sup>1,2)</sup>では、4 種類の金属パイプ(パイプ a: 内径 3 mm × 長さ 10 mm, パイプ b: 内径 3 mm × 長さ 20 mm, パイプ c: 内径 4 mm × 長さ 10 mm, パイプ d: 内径 4 mm × 長さ 20 mm) について、軟 X 線源から任意の距離における透過率を求めており、これらをそれぞれ  $P_a$ ,  $P_b$ ,  $P_c$ ,  $P_d$  とすると、上記で求めた  $P_1$  と比較して、 $P_1 > P_a - P_d$  となる金属パイプを選定することで、透過線量率が常に 1 μSv/h 以下となる。図 4 に  $P_1$  と  $P_a - P_d$  の比較を示す。図 4 より、 $P_1 > P_a - P_d$  となる金属パイプの内、なるべく内径が大きく、長さが短いものを選定する。これは、パイプ内を透過する際の、正負イオンの再結合による消耗を考慮した場合、漏れ線量率を抑える一方で、パイプの径はなるべく大きく、パイプの長さは短いものを選定する方が除電性能面で有利となるためである。選定した金属パイプの内径を多孔板の孔径に、金属パイプの長さを多孔板の板

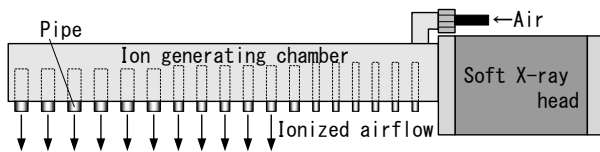


図 1 パイプを用いた遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザー  
Fig. 1 Soft X-ray ionizer with shielding structure consisting of small metal pipes.

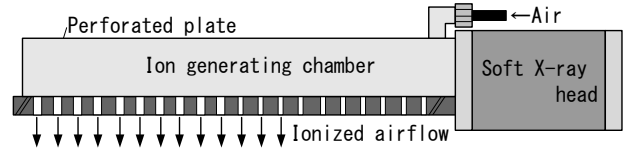


図 2 多孔板を用いた遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザー  
Fig. 2 Soft X-ray ionizer with shielding structure consisting of a perforated plate.

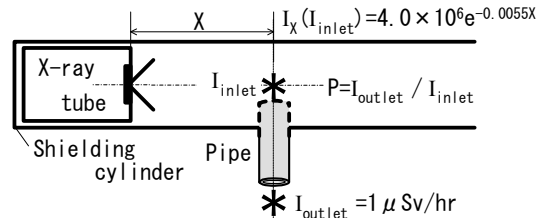


図 3 入射線量率  $I_{inlet}$  と透過線量率  $I_{outlet}$   
Fig. 3 The dose rate at inlet and the dose rate at outlet.

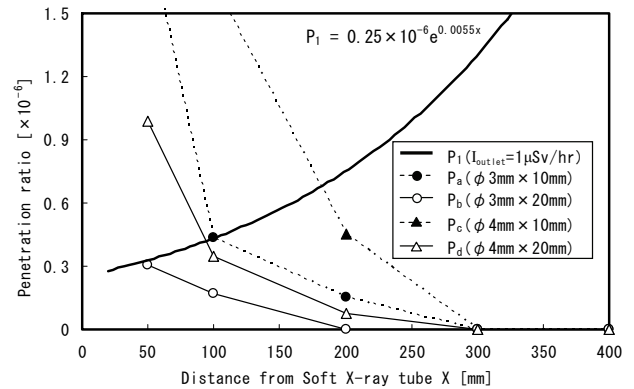


図 4  $P_1$  ( $I_{outlet}=1 \mu\text{Sv/hr}$ ) と  $P_a - P_d$  (金属パイプ透過率) の比較  
Fig. 4 Comparison of  $P_1$  and  $P_a - P_d$ .

厚として置き換えると、多孔板からの透過線量率が 1 μSv/hr 以下となる孔径と板厚が決定する。設計した多孔板の詳細を図 5 に、この多孔板を装着したイオナイザー実験装置の概略を図 6 に示す。多孔板の孔は、軟 X 線照射部から水平距離で 50 mm 離し、照射部に近いエリアに φ3 mm の孔を 20 mm ピッチで 20 個 (10 個 × 2 列)、次いで φ4 mm の孔を 20 mm ピッチで 18 個 (9 個 × 2 列) 配した。板厚を 20 mm、サイズを 430 mm (W) × 130 mm (D) とし、この孔径と板厚により、透過する軟 X 線の線量率がどの位置においても 1 μSv/h 以下となる。この多孔板を吹出部とするイオン化チャンバーに軟 X 線ヘッドを取付け、チャンバー内をイオン化する。コンプレッサーからのエアをイオン化チャンバーに供給し、多孔板の孔からイオン化エアを吹出す。イオン化チャンバーは、容積の違いによる影響を見るため高さのみ異なる、チャンバー A (高さ 260 mm)、チャンバー B (高さ 130 mm) の 2 種類で評価を行った。供給エア量はマスフローメーター (SMC

製 PF2A71) で計測した。除電性能は、帯電プレートモニター (以下 CPM, Trek 製 Model 158) の金属プレート (152 mm×152 mm, 20 pF ± 2 pF) を吹出部下方に設置し、+1 kV もしくは -1 kV に帯電させ、その初期電位が吹出部からのイオン化エアによって十分の +0.1kV もしくは -0.1kV まで減衰する時間 (除電時間) を測定して評価した。除電時間は短いほど、除電性能が優れていることを示す。また、金属プレートを正極性に帯電させた場合は、負イオンによる除電性能を、負極性の場合は、正イオンによる除電性能を評価したことを示す。測定点は吹出部下方 50 mm の位置で、軟 X 線照射部から水平距離が ① 110 mm (φ3 mm の孔のエリア)、② 240 mm (φ3 mm と φ4 mm の混在エリア)、③ 370 mm (φ4 mm の孔のエリア) の 3 箇所とし、CPM 金属プレートの中心が ①-③ となるように設置した。

なお、多孔板の遮蔽性能は、電離箱式サーベイメータ (アロカ製 ICS-321R1) で軟 X 線の漏洩線量率を測定し、1 μSv/hr 以下であることを確認した。遮蔽の基準値 (漏れ線量率の許容値) を 1 μSv/hr 以下とした理由は、X 線応用装置の筐体外側における許容値を、慣例的に安全上 1 μSv/hr 以下としていることに基づいている。

4. 実験結果および考察

4.1 供給エア一量が除電性能に与える影響

イオン化チャンバーのイオン化チャンバーに供給するエア一量が除電性能に与える影響を検討するために、コンプレッサーからのエア一量を 100 L/min, 200 L/min, 300 L/min と変化させた時の除電時間を測定した。図 7 に結果を示す。容積 (高さ) の異なるチャンバー A, B 共に供給エア一量が多い程、全体的に除電時間は短縮し、除電性能が向上した。これは、供給するエア一量が多い程、イオン化チャンバー内で軟 X 線によりイオン化されたエアの吹出量そのものが増加するためと考えられる。一方、供給エア一量に依らず、測定点 ①, ②, ③, つまりイオン化チャンバーの長手方向で除電時間に差が見られ、軟 X 線源に近い位置程除電性能が良い傾向、さらにチャンバー A と B では、容積の小さい (高さの低い) チャンバー B の方が除電性能が良い傾向が見られた。これらの傾向については、供給エア一量以外のパラメータの影響と考

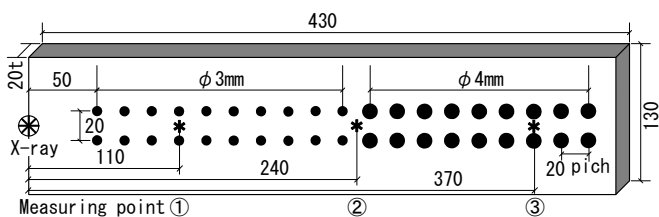
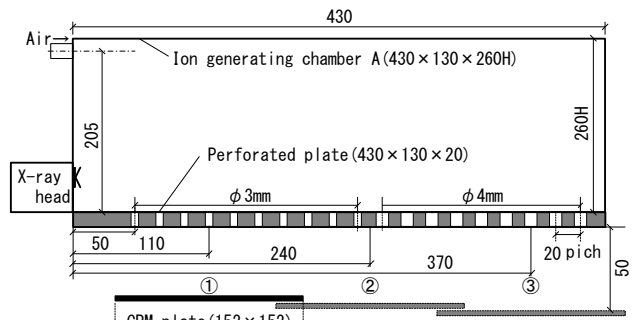
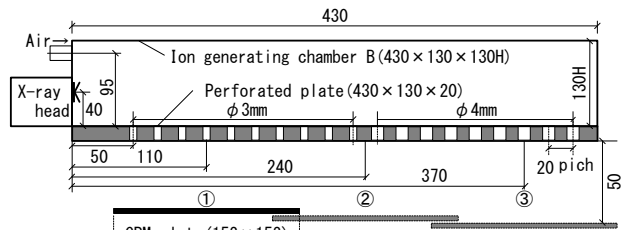


図 5 設計した多孔板の詳細 (模式図)

Fig. 5 Detail of perforated plate.



(a) Chamber A



(b) Chamber B

図 6 実験装置の概略 (模式図)

Fig. 6 Experimental setup for evaluation of charge eliminating performance.

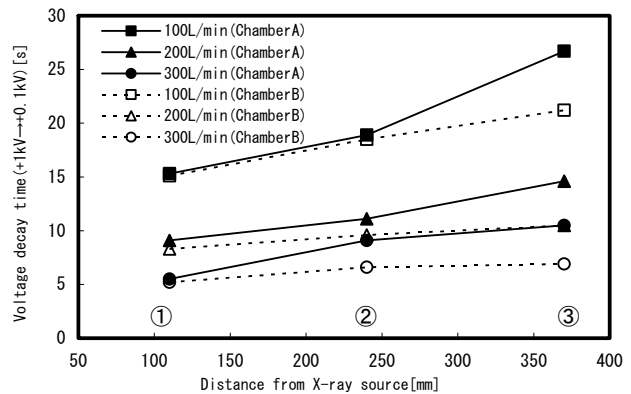


図 7 供給エア一量が除電性能に与える影響

Fig. 7 Influence of the supply air volume on voltage decay time.

られる。なお、ここに示す結果は、負イオンによる除電性能を示しているが、正イオンによる場合も同様の傾向を示した。

4.2 イオン化チャンバー内の軟 X 線強度とイオン化エア一量が除電性能に与える影響

前項 4.1 で見られた傾向も踏まえ、次に、各測定点でのイオン化チャンバー内の軟 X 線の強度とイオン化エア一量 (吹出部から吹出すエア一量) が、除電性能に与える影響を調査した。なお、イオン化チャンバー内の測定点 ①, ②, ③ の位置の軟 X 線の強度についても、前述の、式(1)を用いて線量率として算出した。測定点 ①, ②, ③ の位置におけるイオン化エア一量は、図 8 に示すように、各測定点に CPM の金属プレートを設置した時に、CPM 金属プレート面積分のエアに

ある多孔板の孔から吹出される風量と定義して測定した。測定点①の場合は、 $\phi 3\text{ mm}$  の孔 14 個分、測定点②は、 $\phi 3\text{ mm}$  の孔 8 個と  $\phi 4\text{ mm}$  の孔 8 個分、測定点③は、 $\phi 4\text{ mm}$  の孔 12 個分から吹出される風量となる。イオン化チャンバー内の軟 X 線強度と除電時間の関係を図 9 に、各測定点のイオン化エアーク量と除電時間の関係を図 10 に示す。

図 9 に示すように、軟 X 線の線量率は、線源に近い程大きく、線源からの距離と共に急激に減衰し、軟 X 線線量率が最大の測定点①で最も除電時間が短く、線量率の減衰に伴い除電時間が長くなった。線源からの距離によってイオン化チャンバー内の軟 X 線強度が変化し、それによって生じるイオンの密度も変化するため、除電性能に影響を及ぼしたと考えられる。前項 4.1 で述べた、イオン化チャンバーの長手方向(測定点①, ②, ③)で除電性能に差が見られた原因として、このイオン化チャンバー内の軟 X 線強度が考えられる。

次に、図 10 に示す各測定点のイオン化エアーク量は、チャンパー A, B とも、測定点①のエリアが最少、次いで測定点②のエリアが大きく、測定点③のエリアが最大となった。この相違は、測定点①が  $\phi 3\text{ mm}$  の孔、測定点②が  $\phi 3\text{ mm}$  と  $\phi 4\text{ mm}$  の孔、測定点③が  $\phi 4\text{ mm}$  の孔のエリアにあるため、その孔の抵抗の影響を受けた結果と考えられる。除電時間との関係を見ると、イオン化エアーク量が最少の測定点①で除電時間が最も短く、イオン化エアーク量が最大の測定点③で除電時間が最も長い結果となっている。これは、測定点①のイオン化エアークが、測定点③のイオン化エアークよりも、イオンの密度が高いことを示している。このことから、各測定点における除電性能には、その測定点のイオン化エアーク量よりも、その測定点のイオン化チャンパー内の軟 X 線強度の相違によるイオン密度の相違が影響していると考えられる。一方、チャンパー A と B の各測定点でのイオン化エアーク量を比較すると、どの測定点においてもほぼ等しいにも拘らず、前項 4.1 でも述べたように、チャンパー A と B の除電性能は、容積の小さい(高さの低い)チャンパー B の方が良い。同じ測定点では、

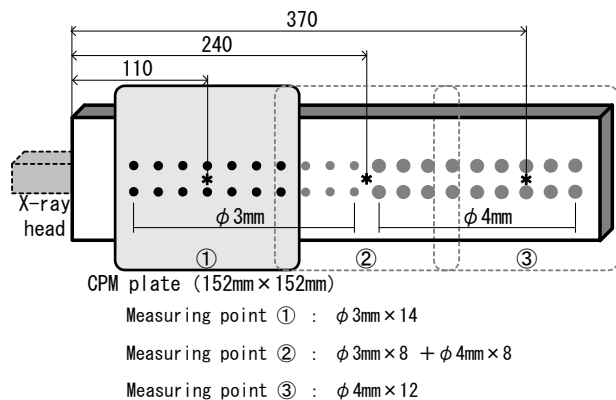


図 8 各測定ポイントの孔の配置

Fig. 8 Distribution of perforation at measuring point ①, ②, ③.

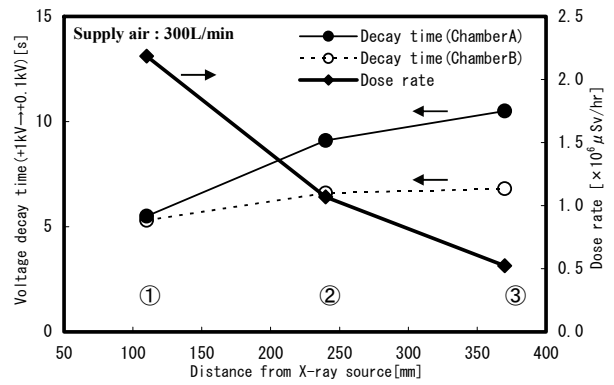


図 9 チャンパー内の軟 X 線強度と除電時間の関係

Fig. 9 Relationship between the dose rate and the voltage decay time.

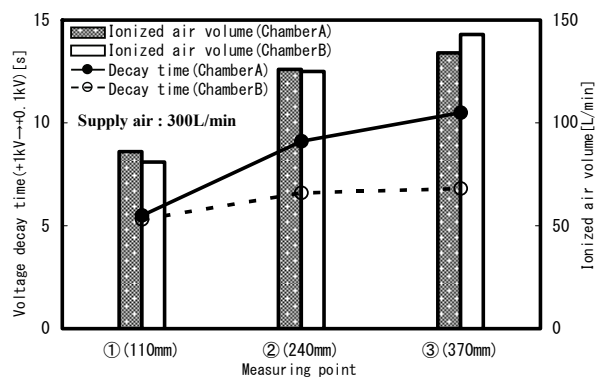


図 10 イオン化エアーク量と除電時間の関係

Fig. 10 Relationship between the ionized air volume and the voltage decay time.

イオン化チャンパー内の軟 X 線強度は等しいため、チャンパー A と B の除電性能の差は、軟 X 線の強度以外の要因で生じたイオン化チャンパー内のイオン密度の相違が影響したものと考えられる。

#### 4.3 チャンパー内気流性状が除電性能に与える影響

軟 X 線の強度分布以外で、イオン化チャンパー内のイオン密度に差が生じる要因としては、イオン化チャンパー内の気流性状が考えられる。そこで、イオン化チャンパー内気流性状の影響を調べるため、イオン化チャンパーへのエアーク導入位置を変えて除電時間を測定した。エアーク導入位置は、図 11 に示すように、線源側からの導入位置を a (チャンパー A), b (チャンパー B) として、それぞれの同一直線上の対面側を a' (チャンパー A), b' (チャンパー B) とした。各測定点での除電時間を図 12 に、この時の各測定点のイオン化エアーク量の分布を図 13 に示す。

図 12 より、a' と b' からエアークを導入した場合には、元の導入位置の a と b からエアークを導入した場合と比べて、全ての測定点で除電時間が短縮した。一方、図 13 に示すように、a' と b' からエアークを導入した場合の各測定点でのイオン化

エア量は、前項 4.2 の図 10 で示した、元のエア導入位置 (a, b) でのイオン化エア量とほぼ同じ分布となった。エア導入位置を変えた場合でも、吹出部である多孔板の孔の抵抗によって、各測定点のイオン化エア量の分布自体は変わらないが、エア導入位置が変わったことでイオン化チャンパー内の気流性状が変化するため、各測定点のイオン化エア中のイオン密度が高くなり、除電性能が向上したと考えられる。またこれは、前項 4.1 で見られた、容積の異なるチャンパー A と B の除電性能に差が現れる傾向の原因の一つでもあり、チャンパー容積の違い (高さの違い) でチャンパー内の気流性状が異なり、各測定点のイオン化エア中のイオン密度に差が生じたためと考えられる。

これらを確認するために、エアの導入位置やチャンパー容積 (高さ) を変えた場合のイオン化チャンパー内の気流性状について、気流シミュレーションを行った。計算対象のチャンパー形状、エア導入位置、吹出部の多孔板の孔径、孔ピッチの条件は、除電性能測定に用いた実験装置と同様とした。また、エア導入位置から 300 L/min で給気を与え、多孔板の孔から吹出した気流は自然流出するものとし、電界や温度については考慮しない。計算に用いたソフトは SCRYU/Tetra (クレイドル社)、メッシュシステムに非構造格子、計算方法に SIMPLE 法、乱流モデルに K-ε モデル、対象流体を非圧縮性流体として計算を行った。各パターンでのイオン化チャンパー内の気流性状の断面を図 14 に示す。元の導入位置である a (チャンパー A) と b (チャンパー B) から

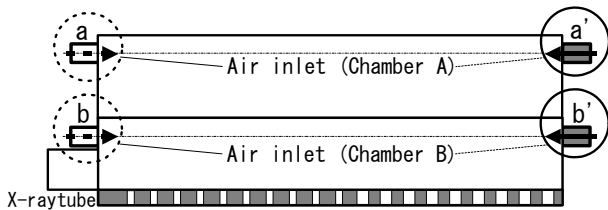


図 11 チャンパー A, B におけるエア導入位置  
Fig. 11 Air inlet position of chamber A, B.

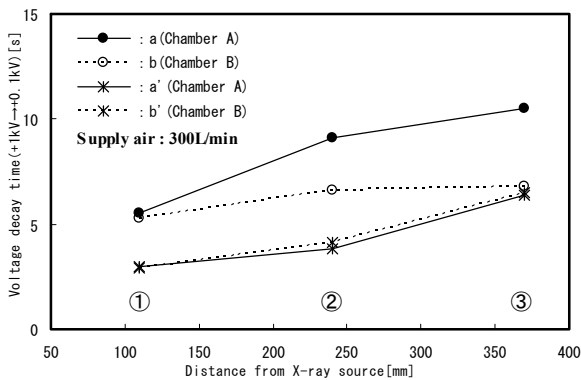


図 12 エア導入位置が除電性能に与える影響  
Fig. 12 Influence of air inlet position on voltage decay time.

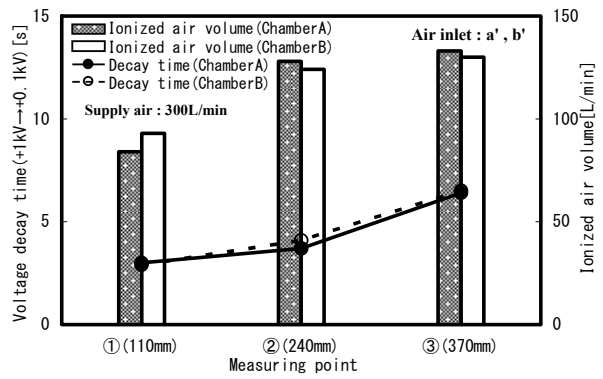


図 13 イオン化エア量と除電時間の関係 (a', b')  
Fig. 13 Relationship between the ionized air volume and the voltage decay time (Air inlet a', b').

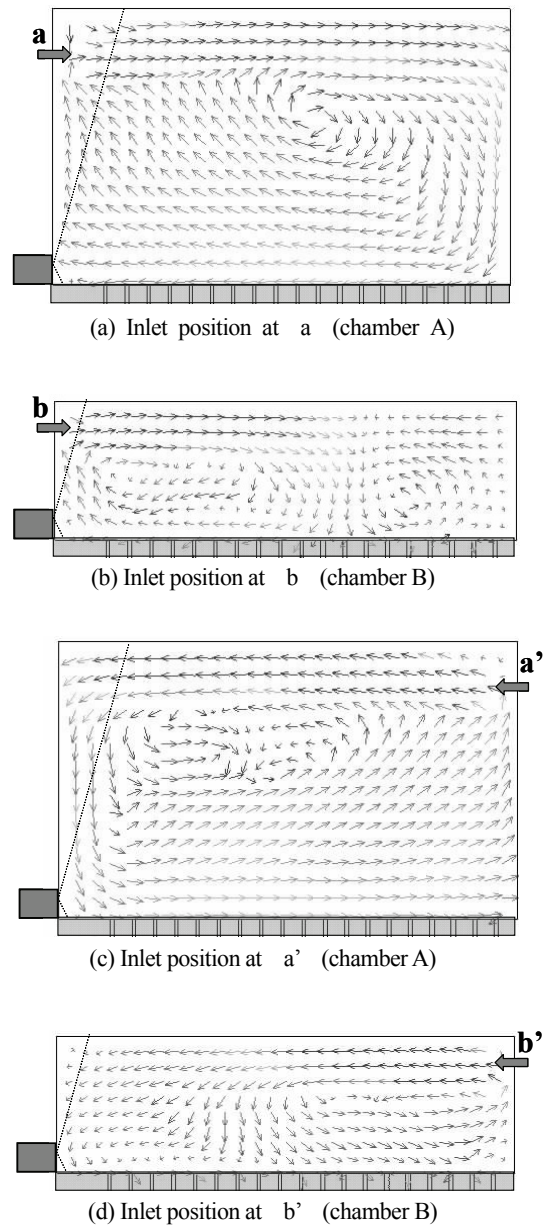


図 14 イオン化チャンパー内の気流パターン  
Fig. 14 Air flow pattern in the ion generating chamber.



エアーを導入した場合は、線源側の軟 X 線強度の強いエリアでイオン化された気流が、反対側の軟 X 線強度の弱いエリアに向って流れ、吹出部に向かって下降し、イオン化チャンバー外へ搬送される動きとなっている。この経路を辿る間に生成したイオンの再結合が促進し、イオン密度が低下していることが考えられる。一方 a' (チャンバーA) と b' (チャンバーB) からエアーを導入した場合は、軟 X 線強度の強いエリアに向かって気流が流れ、線源近傍の最も軟 X 線強度の強いエリアでイオン化され、直後に吹出部に到達している。イオン化されてから吹出部に到達するまでの経路が短いため、イオン密度が高い状態のままチャンバー外に搬送されていることが考えられる。供給エアーの導入位置によってイオン密度 (除電性能) に差が生じるのは、こうした気流性状の影響と考えられる (図 14-(a), (b)と(c), (d)の比較)。次に、容積の異なる (高さの異なる) チャンバーA と B について見ると、元の導入位置 a , b からエアーを導入した場合、容積が小さいチャンバーB は、チャンバーA よりも高さが低く、エアー導入位置と線源との距離がチャンバーA より短い。従って、b から導入したエアーは、a から導入したエアーよりも軟 X 線強度のより強い位置を通過するため、イオン密度が高くなる。一方、対面側の a'、b' から導入したエアーは、どちらも線源近傍でイオン化された直後に吹出部に到達し、チャンバー外までのイオン化エアーが辿る経路に差が無い。従って、イオン化エアーのイオン密度にも差が無く、除電性能がほぼ等しくなる。チャンバーの容積、すなわちチャンバーの高さによってもイオン密度 (除電性能) に差が生じるのはこのためと考えられる (図 14-(a)と(b)の比較, 図 14-(c)と(d)の比較)。

## 5. まとめ

多孔板を用いた遮蔽構造の軟 X 線イオナイザーの除電性能を最適化することを目的として、諸因子が除電性能へ与える影響を調査した。その結果を以下に示す。

- ①イオナイザーに供給するエアー量が多い程、全体的な除電性能は向上する。
- ②イオナイザーからのイオン化エアー量の分布は、軟 X 線遮蔽用の多孔板の孔の抵抗で決定され、供給エアーの導入位置やイオン化チャンバー形状によらない。
- ③除電性能は主としてイオン化エアー中のイオン密度によって決まり、そのイオン密度は、イオン化チャンバー内の軟 X 線強度とイオン化チャンバー内の気流性状の影響を受ける。
- ④イオン化チャンバー内の軟 X 線強度やイオン化チャンバー内の気流性状を制御し、イオン密度を高くすることで除電性能を向上できる。

## 参考文献

- 1) 鈴木政典, 佐藤朋且, 松橋秀明, 水野 彰: 遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザーの遮蔽性能の評価. 静電気学会誌, **31** (2007) 31
- 2) 佐藤朋且, 鈴木政典, 松橋秀明: 遮蔽構造を持つ軟 X 線イオナイザーの開発 (その2). 第 24 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, p. 210, 日本空気清浄協会 (2006)
- 3) 佐藤朋且, 鈴木政典: 遮蔽構造を有する軟 X 線イオナイザーの開発. 第 15 回 EOS/ESD/EMC シンポジウム予稿集, p.171, 日本電子部品信頼性センター (2005)