

双曲線緩和法則によるイオナイザからの パイプ搬送イオン量の推定

深田 佳成^{***,1}, 小根澤 和義^{**}, 小辻 一雄^{**}, 八塚 京子^{*}

(2012年2月20日受付; 2012年5月23日受理)

An Estimation for Ion Cloud Density via Hyperbolic Relaxation Law Transferred through a Pipe

Yoshinari FUKADA,^{***,1} Kazuyoshi ONEZAWA,^{**}

Kazuo KOTSUJI^{**} and Kyoko YATSUZUKA^{*}

(Received February 20, 2012; Accepted May 23, 2012)

In order to eliminate the electrostatic charge, an ionizer with Corona discharge is widely used. The ions, generated by an AC Corona discharge, are often carried through a pipe or a tube toward the vicinity of the object. It is well known that the ion density decreases with the traveling distance, however, the detail mechanisms are not clarified yet. We have investigated about an AC Corona discharge type ionizer with a long pipe and reported that the transferred ion density measured by a Faraday Cage follows to the hyperbolic law. In this report, the ring electrode is employed to measure the transferred charge amount in higher frequency, making the inner cylindrical electrode shorter. Becoming the detecting electrode shorter, the total charge amount cannot be directly obtained, while the almost same ion current wave forms are shown as those in previous reports. Thus, assuming the hyperbolic law to the decrease of the ion density along the pipe length, the total ion density is recalculated and estimated from the measured ion current. There are a good agreement between the experimental and the estimated values. It can be said that this method is effective enough in lower than 100 Hz of AC Corona.

1. はじめに

静電気対策は半導体製造装置, ハードディスクドライブやLCDの製造工程などの電子産業で重要なことは良く知られている。最近, 電子機器の微細化が進み, 微小帯電電圧でも装置に重大な影響を及ぼすようになってきた。この除電に用いるイオナイザの多くはコロナ放電でイオンを発生し, 空気流によって目的対象物まで搬送する。コロナ放電によるイオン発生には直流方式と交流方式があるが, それぞれに得失があり, 目的によって使い分けられている。高周波交流高電圧を用いたイオナイザは除電性能が良いため広く用いられている¹⁻³⁾。その装置では, 発生した正・負両極性イオンが対象

物に到来して除電を行う。イオナイザの最も一般的な評価方法はチャージドプレートモニタ(CPM)を用いた方法である⁴⁾。しかし, 交流高電圧を用いたイオナイザの評価にCPMを用いる場合, 検出電極がオープンになっているため, 電源電圧等による誘導電流の影響を受けることや周波数特性が低いために正確な評価が行えない。我々は交流コロナ放電方式イオナイザの新しい評価法の確立を目指し, 圧縮空気を用いたノズルタイプのイオナイザを用いて直流コロナ放電方式, 交流コロナ放電方式それぞれでイオン搬送特性を解明するための実験を行ってきた。我々はこれまでファラデーケージを用いることでイオン搬送量を測定してきた⁵⁾。ファラデーケージを用いることでCPMの誘導電流の問題点を改善することができる。しかし, ファラデーケージの構造を搬送イオンの全量が測定できるように測定電極を大きくしたため, 高い周波数では搬送される正・負イオンの正味の測定しきれないことが分かった。ただし, 測定電極を小型化した場合, 搬送イオンすべての捕集によってイオン量を評価できない。

そこで一般の電荷の減衰は双曲線緩和法則に順ずるように⁶⁾, ノズルタイプのイオナイザを用いてパイプ中にイオンエアを搬送させた場合, パイプの長さによるイオ

キーワード: イオナイザ, ファラデーケージ, コロナ放電, 双曲線緩和法則, パイプ搬送

* 山形大学大学院理工学研究科 (992-8510 山形県米沢市城南4丁目3-16)

Graduate School of Science and Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

** 株式会社コガネイ (184-8533 東京都小金井市緑町 3-11-28)

Koganei Corporation, 3-11-28 Midori-cho, Koganei, Tokyo 184-8533, Japan

¹ fukada@koganei.co.jp

ン量の減衰が双曲線緩和法則と一致することが確認できた⁷⁾。本論文では、この減衰特性を利用して測定電極で捕集されるイオン量から搬送されるイオン量を推定する方法を確立したので報告する。

2. これまでの実験装置と問題点

これまで実験を行ってきた実験装置の概略を図1に示す。イオン搬送量の測定には、イオナイザにファラデーケージを直接接続した。ファラデーケージ内筒は内径約20 mm、長さ約95 mmで、流路の2次側に金網を取り付けるなどして、搬送イオンすべてがファラデーケージ内筒で捕捉されるように工夫した。また、放電電極とファラデーケージ内筒間の搬送距離 d を約50 mmとした。ファラデーケージで捕らえたイオンによる内筒の電位変化をオシロスコープで測定し、測定系のインピーダンス($Z = 1 \text{ M}\Omega \pm 1\%$)で割ることで電流に換算した。これをイオン電流と呼ぶ。

これまでの実験で印加エア流量を120 L/minとしたとき、搬送されるイオンの平均流速を換算すると約90 m/sであることが分かった⁷⁾。ここで、イオナイザの印加電圧を9 kVp-p、波形を正弦波交流、放電開始終了電圧を $\pm 3 \text{ kV}$ と仮定し、正・負イオン群の幅と正・負イオン群の間隔を計算すると、印加電圧の周波数が100 Hzの場合、正・負イオン群の幅が241 mm、正・負イオン群の間隔が209 mmとなり、300 Hzの場合、正・負イオン群の幅が80.3 mm、正・負イオン群の間隔が69.7 mmと求まる。つまり図2のようなイメージ図となり、イオナイザの周波数を高くしていくと、どちらかの極性のイオンがファラデーケージ内筒電極に完全に捕集される前に、後方の逆極性のイオンがファラデーケージに捕集される可能性があることが分かる。つまり、本構造ではイオナイザの印加電圧の周波数を高くすると正・負搬送イオン量を正確に測定できないことが分かる。

3. 実験装置及び実験方法

3.1 実験装置の構造検討

第2節より交流コロナ放電方式イオナイザの印加電圧の周波数が高いものを測定する場合、ファラデーケージの内筒電極の長さを短くする必要がある。上述した計算方法により印加電圧の周波数が10 kHzの場合を計算すると、正・負イオン群の幅が2.4 mm、正・負イオン群の間隔が2.1 mmとなる。これより周波数10 kHzの場合で内筒電極の長さは1 mm以下が有効であると考えられる。しかし、これでは搬送されたイオンはすべて捕集されず、搬送されたイオン量が分からない。そこでファラデーケージの内筒電極の長さを変え、測定されるイオン電流を測定することで搬送されるイオン量の推定方法を検討する。

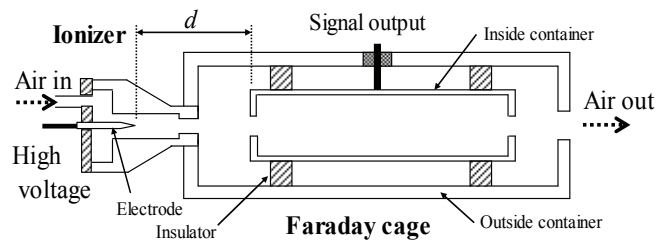
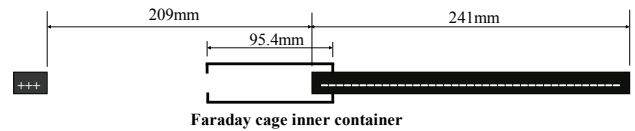
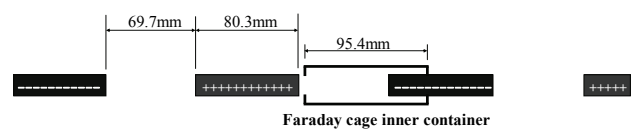


図1 以前の実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.



(a) 100Hz



(b) 300Hz

図2 イオン群の長さと同隔

Fig. 2 The length and interval of ions cloud.

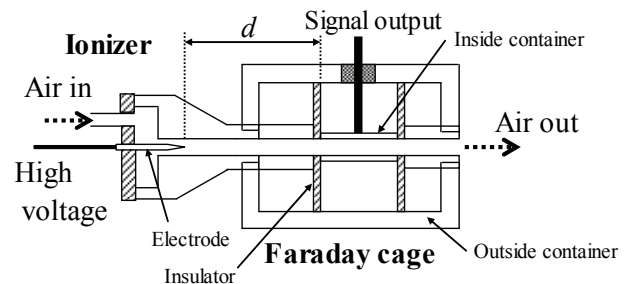


図3 実験装置

Fig. 3 Experimental apparatus.

3.2 実験装置及び実験方法

今回製作したファラデーケージを用いた実験装置の概略を図3に示す。ファラデーケージの内筒電極はリング型の形状とし、長さを1, 3, 5, 10 mmとし、内径を5 mmとした。また、内筒リング電極は0.2 mmの長さの絶縁物を外筒電極との間に挟むことで絶縁し、イオンの搬送流路は測定部を含め円筒形状とした。放電電極とリング電極間の搬送距離 d を約40 mmとした。イオナイザには印加電圧9 kVp-pを印加し、波形を正弦波交流、電源周波数を1, 10, 100 Hzとした。印加エア流量は40–180 L/minとした。また、ファラデーケージで捕らえたイオンによるリング電極の電位変化をオシロスコープで測定し、測定系のインピーダンスで割ることで電流に換算した。

4. 実験結果

4.1 電極-リング電極間平均エア流速

放電電極にパルスの正の高電圧を印加し、コロナ放電によって正イオンを発生させ、エア流れによってイオンを搬送し、リング電極で捕集させる。これにより正イオンが放電電極で発生してから、リング電極で捕集されるまでの時間が求まる。放電電極-リング電極間の距離から放電電極-リング電極間平均エア流速に換算した結果を図4に示す。図より印加エア流量の増加に伴い平均エア流速は増加することが分かる。流路内部での圧力変化も考慮すると、平均流速は印加エア流量の平方にゆるやかに比例する。

4.2 イオン電流

印加電圧 9 kVp-p, 波形を正弦波交流, 電源周波数 1, 10, 100 Hz, 印加エア流量 120 L/min, 内筒電極の長さを 1 mm で測定したオシロスコープでの測定波形を印加電圧波形とともに図5に示す。イオン電流の波形の形状はこれまでの実験結果同様にある閾電圧まで増加するとイオン電流は立ち上がり、その後電圧の変化によって大きな変化はなく、閾電圧以下になるとイオン電流は0となる⁵⁾。ただし、これまでの測定結果と異なり、正・負イオン電流波形の立ち上がり・立ち下

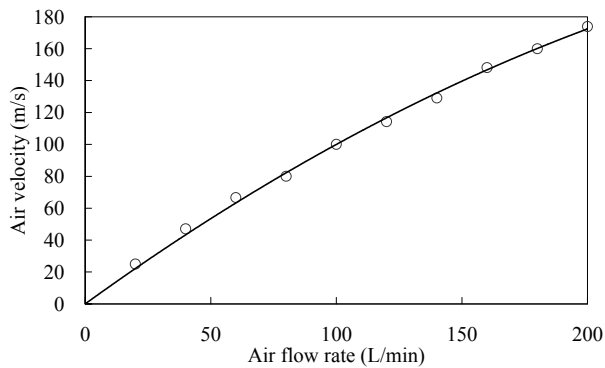


図4 放電電極-リング電極間平均エア流速
Fig. 4 Average air velocity between the discharge electrode and the ring electrode.

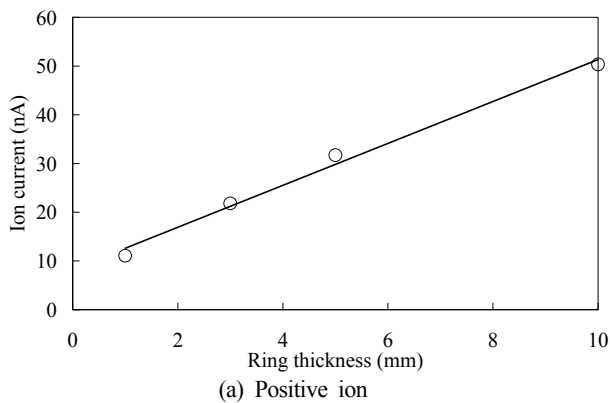
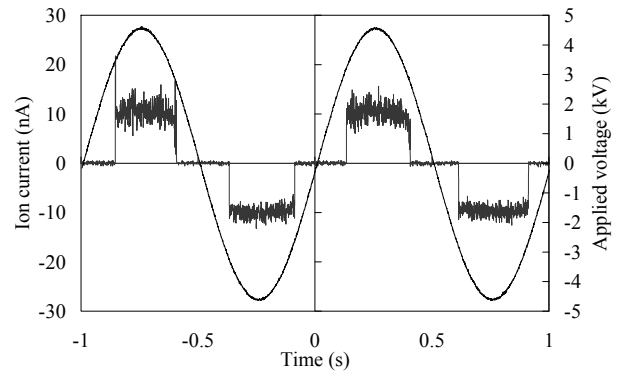
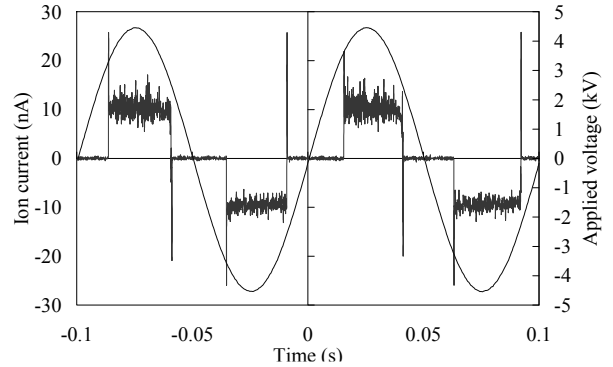


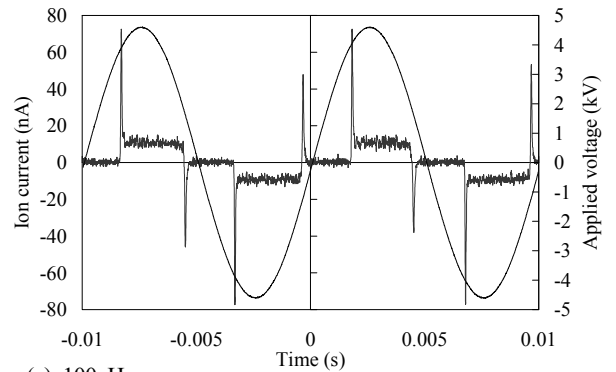
図6 リング厚さ別イオン電流特性
Fig. 6 Dependency of ion current on ring thickness.



(a) 1 Hz



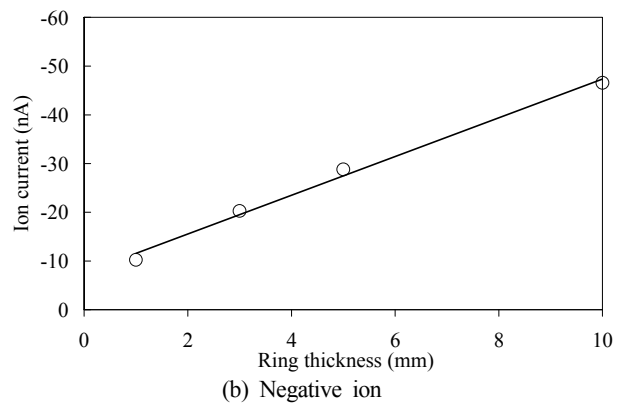
(b) 10 Hz



(c) 100 Hz

図5 測定波形

Fig. 5 Measured configuration of wave shape.



(b) Negative ion

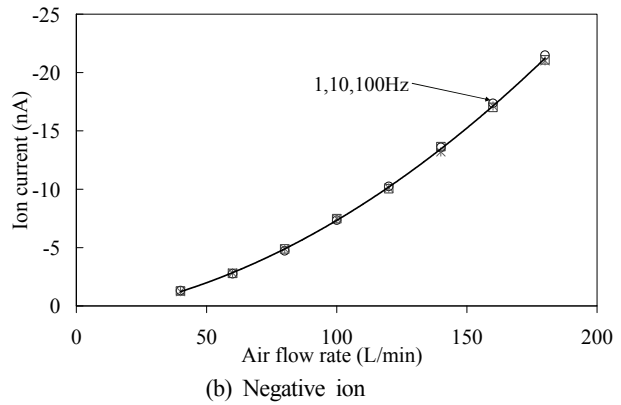
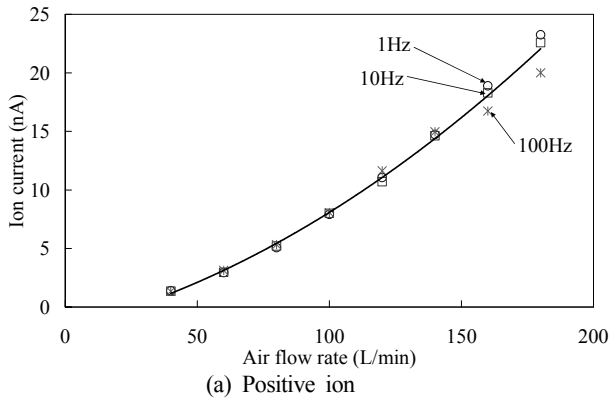


図7 印加エア流量別イオン電流特性
Fig. 7 Dependency of ion current on air flow rate.

がりにピーク波形が見られる。これは搬送されたイオンによる誘導電流であると考えられる。以前に用いていた図1のファラデーケージでも誘導電流は測定されていたと考えられるが、値が捕集されるイオン電流に比べ小さかったため、測定波形では確認できなかったと考えられる。

印加電圧 9 kVp-p, 波形を正弦波交流, 電源周波数 10 Hz, 印加エア流量 120 L/min, リング電極の厚さを 1, 3, 5, 10 mm と変えたときのイオン電流を求めたものを図6に示す。結果は測定波形 100 周期の平均値である。図より、内筒電極の長さの増加に伴いイオン電流は増加する。しかし、これまでのファラデーケージで同様のイオナイザの条件で測定したイオン電流は 275 nA であったことから、本実験装置で測定できたイオン電流は非常に小さく、搬送されたすべてのイオンが捕集されていないことが分かる。

印加電圧 9 kVp-p, 波形を正弦波交流, 電源周波数 1, 10, 100 Hz, リング電極の厚さを 1 mm とし、印加エア流量を 40-180 L/min と変えたときのイオン電流を図7に示す。結果は測定波形 100 周期の平均値である。図よりイオン電流は印加エア流量の増加に伴い2次関数的に増加する。また、周波数による差はほぼない。正・負イオン量を比較すると若干であるが、正イオンの方が大きい。

5. 考察

5.1 搬送イオン量推定方法

これまでの実験によって、放電電極とリング電極間の搬送距離 d での搬送イオン量の減衰が双曲線緩和法則と良い一致を示すことが分かった⁷⁾。つまり、パイプ内を通る過程で双曲線緩和法則により次第に電荷密度が減衰していると考えられる。その関係を図8のようなモデルで考える。

ここで双曲線緩和法則の式を示す⁶⁾。

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{1}{1 + l/\tau} \tag{1}$$

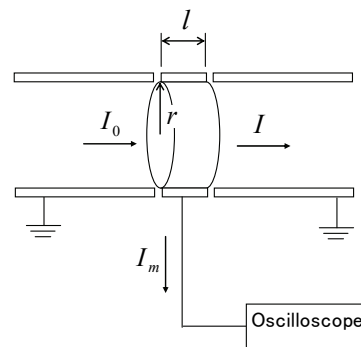


図8 解析モデル
Fig. 8 Simulation model.

ただし、 ρ_0 は初期電荷密度、 τ は時定数を示す。また、時定数 τ は次式となる。

$$\tau = \frac{\epsilon_0}{\rho_0 \mu} \tag{2}$$

ここで ϵ_0 は真空の誘電率、 μ は移動度を表す。式(1)の時間を距離で置き換える。

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \frac{d}{U\tau}} \tag{3}$$

ただし、 d は搬送距離、 U はイオン平均流速を示す。図8では電流の連続から次のような関係がある。ここでは定常状態のみを考える。

$$I_0 = I + I_m \tag{4}$$

それぞれのイオン電流は次のように表される。

$$I_0 = \rho_0 \pi r^2 U \tag{5}$$

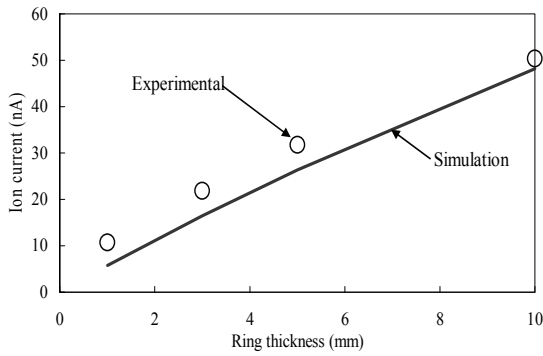
$$I = \rho \pi r^2 U \tag{6}$$

電流の連続式に式(5)と式(6)を代入する。

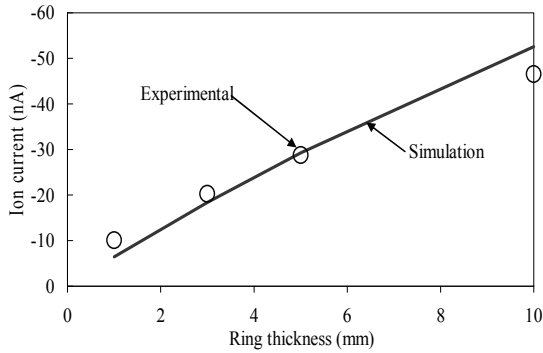
$$I_m = (\rho_0 - \rho) \pi r^2 U \tag{7}$$

式(7)に式(3)を代入すると、

$$I_m = \pi r^2 U \rho_0 \frac{l}{U\tau + l} \tag{8}$$



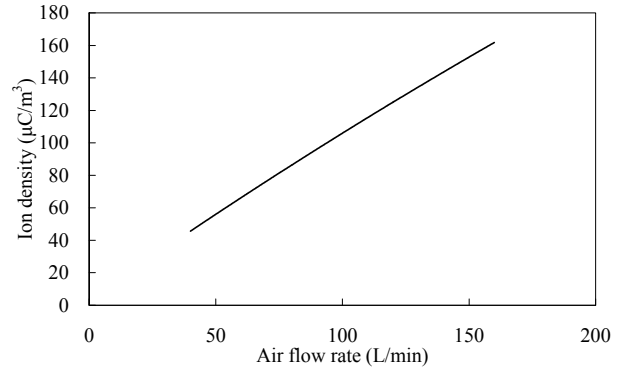
(a) Positive ion



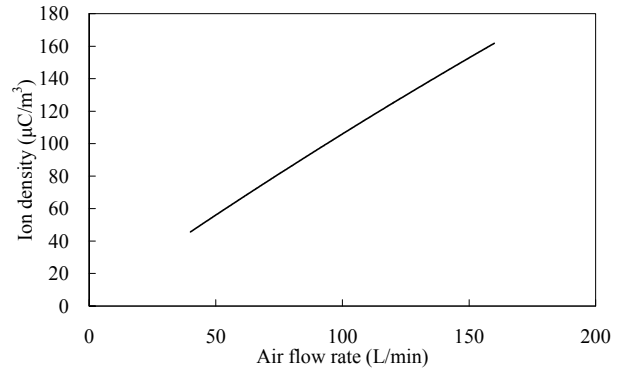
(b) Negative ion

図9 イオン電流推定値と実験値の比較

Fig. 9 The comparison of simulation values and experimental results.



(a) Positive ion



(b) Negative ion

図10 リング電極進入イオン密度推定値 ρ_0

Fig.10 Estimated transferred ions ρ_0 .

ただし、図8のようにリング電極通過時のイオン電流の変化を考えているため、搬送距離 d をリング長さ l に置き換えた。式(8)より、これまでの実験方法で得た結果から内筒電極の長さを変えた場合のイオン電流値と実験結果を比較したものを図9に示す。ただし、実験条件は図6と同様であり、正・負イオン移動度はこれまでの実験結果から得られた $\mu_+ = 1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 、 $\mu_- = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ を用いた⁸⁾。図より実験結果と計算結果が良い一致を示しているのが分かる。ただし、リング長さが短い場合では実験結果が計算結果より大きな値を示している。これは内筒電極を外筒電極と絶縁するための前後の絶縁物の影響であると考えられる。つまり、計算ではリング前後は絶縁された金属であると仮定しているが、実際は絶縁物で保持されており、絶縁物の場合、パイプ内の電荷による電位分布が絶縁物内にも存在するため、これが影響し計算結果より大きな値が得られたと考えられる。また、リング長さが長くなることによりこの値の影響が小さくなると考えられる。

上述により内筒電極で測定されたイオン電流は双曲線緩和法則による理論式と良い一致を示すことが確認できた。この理論式から内筒電極で測定されたイオン電流の値によって、ファラデーケージの内筒電極に進入するイオンの電荷密度

ρ_0 は次式より推定することができる。

$$\rho_0 = \frac{I_m}{\pi r^2 U} \frac{U\tau + l}{l} \quad (9)$$

リング長さ 1 mm での実験結果を用いて印加エア流量ごとの搬送イオンの電荷密度を推定した結果を図10に示す。図のように印加エア流量が増加するに従ってイオン濃度は高くなっている。

このようにリング電極で得られたイオン電流からリング進入時の電荷密度が推定できた。これを応用することでリング電極進入時の搬送イオンの電荷密度と双曲線緩和法則からファラデーケージの吹出口から吹き出るイオン量を推定することも可能である。また、交流コロナの場合は図5のようにイオン発生期間と未発生期間があり、正味の正・負イオン量は推定した電荷密度とイオン発生期間の積から求まる。

5.2 搬送イオン量を推定できない場合

最後に本搬送イオン量推定方法で推定できない場合を考える。4.2節で述べたように、リング型ファラデーケージで搬送イオンを測定した場合、図5のイオン電流波形のように誘導電流が見られる。その誘導電流は周波数が高くなるか、あるいはイオンを搬送するエア流速が遅くなるに従って、イオン電流と重なりあうようになる。一例を図11に示す。これ

は印加電圧 9 kVp-p, 波形を正弦波交流, 電源周波数 500 Hz, 印加エア流量が 30 L/min, 内筒電極長さ 1 mm の場合である。このようにイオン電流が誘導電流と完全に重なり合ってしまうと, イオン電流が測定できなくなり搬送イオン量は推定できない。電源周波数が 100 Hz 以下では 10 L/min のような低い印加エア流量からイオン電流が誘導電流に重なりあわずに測定できた。これより本構造については電源周波数 100 Hz 以下ではどの印加エア流量でもイオン電流から搬送されるイオン量の推定は可能であると考えられる。

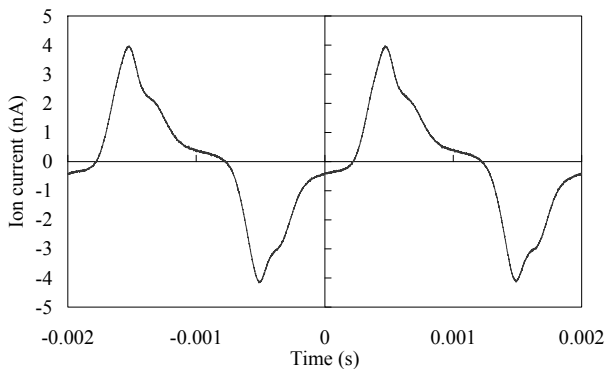


図 11 測定イオン電流波形
($f=500$ Hz, $Q=30$ L/min)

Fig. 11 Measured configuration of wave shape.
($f=500$ Hz, $Q=30$ L/min)

6. おわりに

本研究より下記の 8 点が分かる。

- (1) ノズルタイプのイオナイザによりパイプ中を搬送されたイオンは双曲線緩和法則と一致して減衰する。
- (2) パイプ中を搬送されるエアは印加エア流量の増加に伴い平方根でエア流速が増加する。
- (3) ファラデーケージの内筒電極をリング型にすることで誘導電流の波形が顕著に見られる。
- (4) ファラデーケージのリング型内筒電極の長さの増加に比例して捕集されるイオン電流が増加する。

- (5) イオナイザの印加エア流量の増加に伴い 2 次関数的に捕集されるイオン電流が増加する。
- (6) 電源周波数が 100 Hz 以下ではイオン電流に電源周波数による差はほぼなく, 正イオン電流の方が負イオン電流より大きい。
- (7) リング型ファラデーケージを用いることで捕集されたイオン電流と双曲線緩和法則によりノズル, パイプ中を搬送されるイオン量の推定が可能である。
- (8) イオナイザの電源周波数が大きくなる, もしくは印加エア流量が小さくなると誘導電流とイオン電流波形が重なりあい, イオン電流が測定できないため搬送されるイオン量は推定できない。

本研究を行うにあたり, 有益なご議論とご助言を頂いた山形大学の浅野和俊名誉教授に対し, 心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 清水 渡, 永田秀海, 和泉健吉: 電子デバイスの ESD 対策に適した高周波コロナ放電式イオナイザの開発. 2004 年静電気学会講演論文集, p. 193, 静電気学会(2004)
- 2) 清水 渡, 永田秀海, 和泉健吉, 児玉 勉: 高周波コロナ放電式ノズル型イオナイザの除電特性. 静電気学会誌, **29** (2005) 62
- 3) A. Osawa: Efficient charge neutralization with an ac corona ionizer. J. Electrostatics, **65** (2007) 598
- 4) EOS/ESD Association standard for protection of electrostatic discharge susceptible items-ionization, EOS/ESD-S 3.1-1991
- 5) K. Asano, Y. Fukada and T. Yasukawa: Measurement of AC ion current from a corona ionizer using a Faraday cage. J. Electrostat., **66** (2008) 275
- 6) 静電気学会編: 新版静電気ハンドブック, オーム社, p.1009 (1998)
- 7) 深田佳成, 伊藤優希, 安川尚志, 八塚京子: 高速気流イオン搬送における搬送距離別イオン量特性. 2008 年静電気学会春期講演論文集, p. 71, 静電気学会 (2008)
- 8) Y. Fukada, T. Yasukawa and K. Yatsuzuka: An estimation for relaxation characteristics of an ionizer ion cloud density transferred through a pipe via hyperbolic law. Electrostatic Joint Conference, P1.24, Boston (2009)