

# 正・負両極性イオン搬送量の分離測定に関する研究

深田 佳成<sup>\*,\*\*,\*1</sup>, 安川 尚志<sup>\*\*</sup>, 八塚 京子<sup>\*</sup>

(2008年8月20日受付; 2009年1月6日受理)

## A Study of Separation of Transferred Positive and Negative Ions from AC Corona Discharge

Yoshinari FUKADA<sup>\*,\*\*,\*1</sup> Takashi YASUKAWA<sup>\*\*</sup> and Kyoko YATSUZUKA<sup>\*</sup>

(Received August 20, 2008; Accepted January 6, 2009)

An AC corona discharge ionizer is one of the most useful equipment to eliminate electrostatic charge on electronic devices. This paper represents the measurements of the positive and negative ions transferred by an AC corona discharge ionizer by Faraday cage in which a rod electrode is inserted to form a deflecting electric field. With this Faraday cage, the positive and negative ions are detected separately by applying the voltage on the rod electrode. With increase of the voltage on the rod electrode, the ion currents of the same polarity increased, while the ion currents of the opposite polarity decreased. And the ion current of the same polarity tends to be saturated. Charge amount and discharge duration time of positive ions are larger than those of negative ions. Negative ions are easier to be deflected by the electric field than positive ions are. In addition, we showed that the predicted motion in the electric field calculated analytically has a good agreement of the experimental results.

### 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において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ー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ーは除電性能が良いため広く用いられている<sup>1-3)</sup>。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。このイオナイザー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<sup>4)</sup>。しかし, CPMを高周波交流高電圧を用いたイオナイザーの評価に用いる場合, 誘導電流の影響を受け

ることや周波数特性が高くないために正確な評価が行えない。我々は交流コロナで発生する両極性イオンによる除去メカニズムの解明を目指して, ファラデーケージを用いた新たなイオン搬送量測定方法を検討している<sup>5, 6)</sup>。しかし, 試作した単純な構造のファラデーケージでは高い周波数特性が得られず, 改善が必要となった。本研究では, 正・負イオンを偏向電界で分離して別々に測定するためにファラデーケージ内に棒電極を挿入して偏向電界を形成し, イオンを偏向させて分離捕集を行える装置を開発し, イオンの分離特性を実験と数値解析で検討した結果を報告する。

**キーワード:** イオナイザー, ファラデーケージ, コロナ放電, 偏向電界, イオン分離

\* 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-shi, 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-shi, Tokyo 184-8533, Japan

<sup>1</sup> fukada@koganei.co.jp

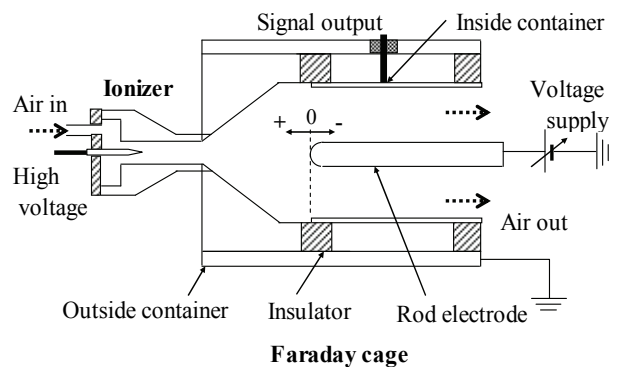


図1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

## 2. 実験方法

図1に実験装置の概略を示す。イオナイザーにファラデーケージを接続し、ファラデーケージの中心軸上に正または、負の電圧を印加できる棒電極を挿入した。棒電極とファラデーケージ内筒電極によって同軸円筒型の電界を形成し、正・負イオンを偏向する。内筒電極からの出力信号はオシロスコープで観測し、電圧波形と測定系のインピーダンスからイオン電流に換算し、イオン搬送量を算出した。イオナイザーの放電電極には、試作イオナイザーで放電が安定した印加電圧  $9 \text{ kV}_{p-p}$  を印加し、放電周波数は後の考察で示すようにイオン群の挙動を検討しやすいように  $1 \text{ Hz}$  とした。また、エア流量は印加圧縮エアの圧力を  $0.1 \text{ MPa}$  としたときの流量で、約  $85 \text{ L/min}$  一定とした。ファラデーケージ内筒電極は内径  $30 \text{ mm}$ 、長さ  $40 \text{ mm}$  であり、棒電極形状は直径  $5 \text{ mm}$ 、先端半径  $2.5 \text{ mm}$  とした。また棒電極は内筒先端を基準に  $x = +10 \sim -5 \text{ mm}$  と設置位置を変えられ、棒電極に電圧を  $\pm 300 \text{ V}$  まで印加して測定した。ファラデーケージ流入口と棒電極の距離を十分に離し、イオナイザー放電部の流速や圧力には影響を与えないように工夫した。棒電極が形成する偏向電界は後述する数値解析で示すように、イオナイザー放電部の電界に影響を与えない。よって、イオナイザーが発生するイオン量は棒電極の位置・偏向電界によらず、常に一定であると考えられる。

## 3. 実験結果

### 3.1 イオン電流波形

棒電極位置  $x = 0 \text{ mm}$ 、棒電極に電圧を印加していない場合の測定波形の例を図2(a)に示す。図の正弦波はイオナイザーへの印加電圧波形を表し、矩形波は内筒電極の出力電圧を表している。イオン電流波形は測定回数  $100$  回の平均値であり、オシロスコープのデータを数値データとしてプロットしたものである。

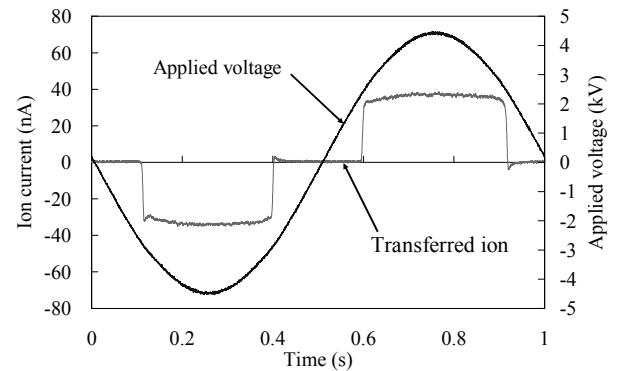
イオナイザーの印加電圧が閾値電圧以上になるとイオン電流が現れ、その後電圧の変化によるイオン電流の大きさの変化は少なく、閾値電圧以下になるとイオン電流が  $0$  になることが分かる。これは以前の発表と同様の様相である<sup>5, 6)</sup>。

棒電極に電圧を印加した代表波形として、棒電極位置  $x = 0 \text{ mm}$ 、印加電圧  $\pm 100 \text{ V}$  時の測定波形の例をそれぞれ図2(b),(c)に示す。棒電極への印加電圧と同極性のイオン電流は増加し、逆極性のイオン電流は減少するのが分かる。これは棒電極とファラデーケージ間の電界により同極性イオンはファラデーケージ側に偏向し、逆極性イオンは棒電極側に偏向したためであると考えられ、棒電極に電圧を印加することにより正・負イオンがある程度分離されていることが分かる。

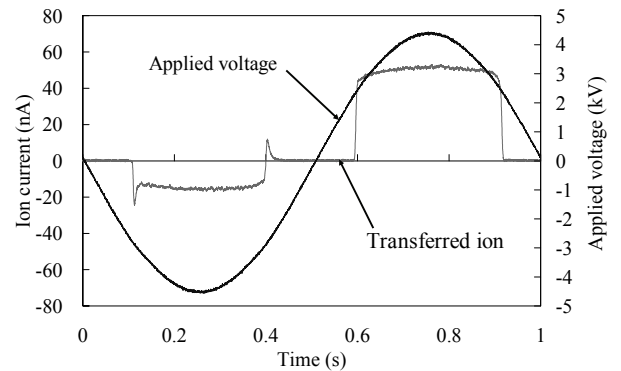
測定波形には立上り、立下りにピーク波形が見られた。特に棒電極に電圧を印加した状態で、減少した方のイオンでは顕著にそのピークが見られる。このピークは図3のイオン電

流の拡大図のように印加電圧の増加に伴い更に顕著になる。これはイオン群がファラデーケージ内へ進入したときの誘導電流であると考えられ、この誘導電流の値の直接測定が困難であるため、定常時の電流値で検討を行う。定常時とはイオン群がファラデーケージ内へ進入し、内筒電極入口から出口まで広がって円筒に捕集され続けている間のことを示す。

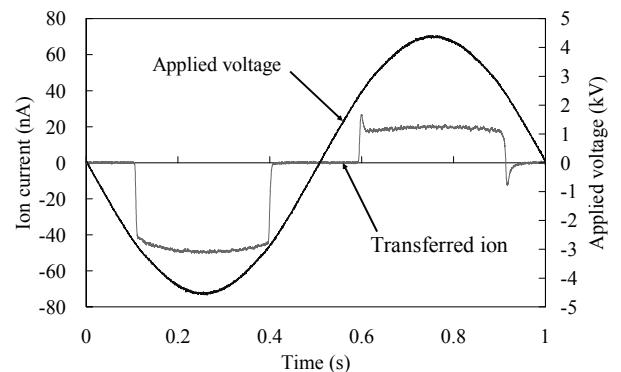
また、立下りのピーク波形はイオン群の内筒電極での捕集が終了したことを示していて、ピーク波形直前で定常状態は終了したと考える。よって定常時のイオン電流は立上り、立



(a) Rod electrode voltage:  $0 \text{ V}$



(b) Rod electrode voltage:  $+100 \text{ V}$



(c) Rod electrode voltage:  $-100 \text{ V}$

図2 測定波形

Fig. 2 Measured configuration of wave shape.

下りのピーク波形の間の電流から求められる。

3.2 イオン電流の棒電極電圧依存性

棒電極を  $x = 0$  mm に固定し、棒電極への印加電圧を変えたときの定常状態でのイオン電流とその近似曲線を図4に示す。

図4(a)は棒電極に正電圧を印加したときの正イオン電流と負イオン電流の棒電極電圧依存性を調べたものである。これを見ると、棒電極の印加電圧と同極性の正イオンは電圧の増加に伴い増加し、印加電圧160 V程度で飽和する。更に、印加電圧を増加すると280 V以上で若干の減少が見られる。棒電極の印加電圧と逆極性の負イオンは電圧の増加に伴い減少し、0 Aに近づく。

図4(b)は棒電極に負電圧を印加したものである。図4(a)と同様の傾向を示し、棒電極の印加電圧と同極性の負イオンは電圧の増加に伴い増加し、印加電圧-140 V程度で飽和する。更に、印加電圧を増加すると-280 V以上で若干の減少が見られる。棒電極の印加電圧と逆極性の正イオンは電圧の増加に伴い減少し、0 Aに近づく。

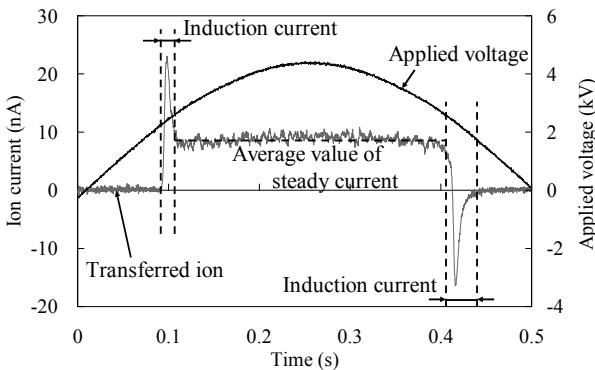
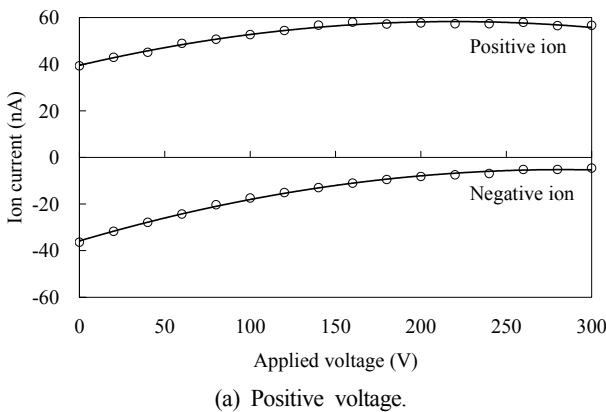


図3 定常電流と誘導電流 (棒電極電圧: -200 V)  
Fig. 3 Steady current and induction current.  
(Rod electrode voltage: -200 V)



(a) Positive voltage.

図4(a),(b)を比較すると正・負イオン電流の飽和電流は、それぞれ約58,-52 nAであり、正イオン電流の方が大きい。棒電極位置  $x = 0$  mm では印加電圧±300 Vでも逆極性イオン電流を完全に0 Aまで減少できない。

3.3 イオン電流の棒電極位置による変化

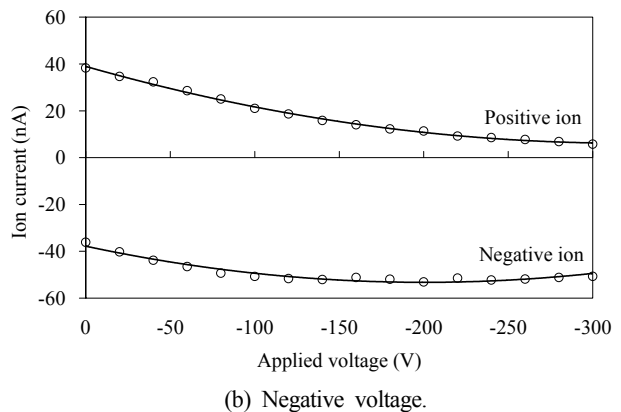
棒電極位置を変えて上記と同じ方法でイオン電流を測定した結果を図5に示す。

図5(a)は棒電極に正電圧を印加したものである。印加電圧0 Vでのイオン電流が棒電極の位置によって異なり、棒電極位置がイオナイザー吹き出し口から遠い程 ( $x < 0$ )、負イオン電流が大きい。これは棒電極とファラデーケージによって形成される電界が弱くなるために負イオンの減少が少ない。捕集された正イオンは電極位置にあまり影響を受けない。

図5(b)は棒電極に負電圧を印加したものである。図5(a)と同様の傾向を示し、印加電圧0 Vで、棒電極位置がイオナイザー吹き出し口から遠い程 ( $x < 0$ )、正イオン電流が大きい。捕集された負イオンは電極位置にあまり影響を受けない。

飽和電流の最大値は棒電極位置  $x = +10$  mm のときで、正・負イオンでそれぞれ59,-54 nAであったが、棒電極位置による大きな差はない。これに対し、棒電極の印加電圧と逆極性のイオンは棒電極位置  $x = +10$  mm で正・負イオンともに0 Aに到達した。また0 Aに到達した際の印加電圧を比較すると、正・負電圧がそれぞれ220,-280 Vであり負イオンの方が低い電圧で0 Aに到達している。これより、負イオンの方が電圧の影響を受けやすいと考えられる。これは負イオンの方が正イオンより移動度が大きいことが原因と考える<sup>7)</sup>。

また0 Aに到達した際の棒電極電圧は飽和電流に達する電圧より大きい。これは電極位置がファラデーケージ進入部と同軸であり、ファラデーケージに進入したイオン群が棒電極方向へ移動しやすいためであると考えられる。



(b) Negative voltage.

図4 印加電圧-捕集イオンのイオン電流特性 ( $x = 0$  mm)

Fig. 4 Dependency of ion current of collected ion on applied voltage ( $x = 0$  mm).

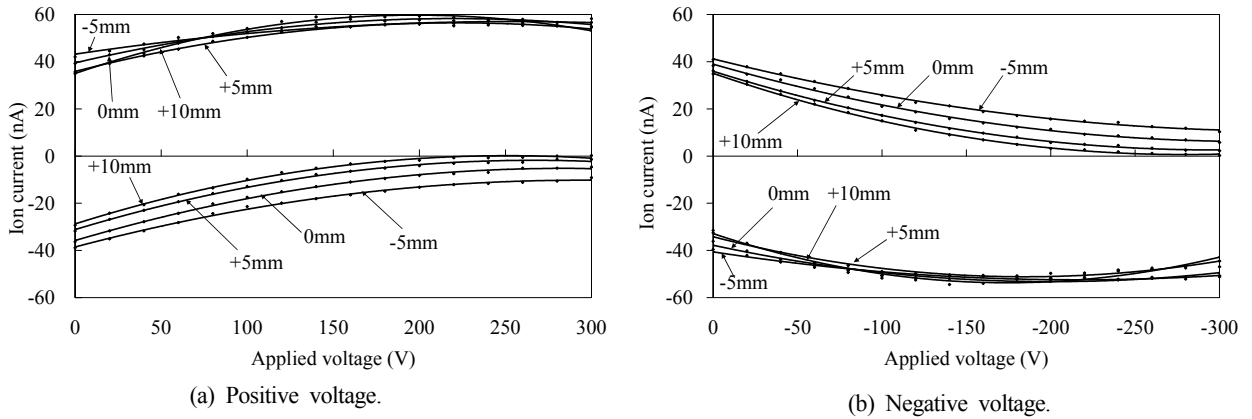


図5 印加電圧—捕集イオンのイオン電流特性  
Fig. 5 Dependency of ion current of collected ion on applied voltage.

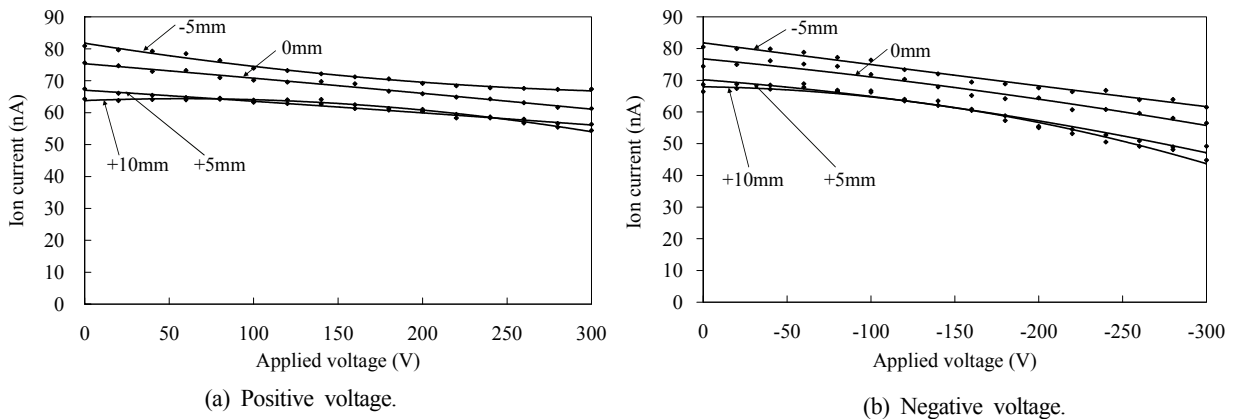


図6 印加電圧—捕集イオンの正・負イオン電流合計値特性  
Fig. 6 Dependency of the sum of ion current of collected ion on applied voltage.

#### 4. 考察と解析

##### 4.1 正・負イオン電流の和

3.3で測定した正・負イオン電流の絶対値の和を図6に示す。イオナイザーから注入されるイオン量は同一であるから、正負両イオンの和は本来ならば一定のはずである。しかし、棒電極位置  $x = +10 \text{ mm}$  では  $\pm 100 \text{ V}$  まで変化しないが、更に電圧が高くなるとイオン電流の合計値は緩やかに減少している。また、棒電極位置  $x = +10 \text{ mm}$  以外では印加電圧の増加に伴いイオン電流の合計値は緩やかに減少している。これは棒電極先端部の電界の影響が電圧の増加に伴い大きくなり、イオナイザーとファラデーケージの結合部分などへイオンが捕集されることが原因と考えられる。

また棒電極位置  $x = +5, +10 \text{ mm}$  での合計値に大きな差が無い。これより棒電極位置  $x = +5 \text{ mm}$  以上では棒電極先端へのイオンの捕集は飽和し、捕集されず残ったイオンが棒電極円筒部分のイオン分離電界領域に進むので、電界による正・負イオンの移動を検討することができる。と考える。

##### 4.2 電荷密度

図2(a)に示した波形で、測定したイオン電流値とイオン電流生成時間から搬送された電荷量を推定できる。イオン電流の生成時間は定常状態の時間と立上り時の誘導電流波形の時間を合わせた時間とした。これは誘導電流発生の間でもイオンがファラデーケージに捕集されたと考えられるためである。イオン電流波形の生成時間は印加電圧1サイクルにおいて正イオンで約  $300 \text{ ms}$ 、負イオンで約  $260 \text{ ms}$  であった。また棒電極位置、棒電極電圧による生成時間の変化はほとんど無い。搬送された電荷量はイオン電流と生成時間の積である。正・負イオンの電荷量の和を図7に示す。

図7(a)は棒電極に正電圧を印加したときの正・負イオンの電荷量の和の印加電圧特性である。棒電極電圧  $80 \text{ V}$  以下では電荷量の和は変わらないが、 $80 \text{ V}$  より高いと減少する。

また図7(b)に棒電極に負電圧を印加したときの正負イオンの印加電圧特性を示す。棒電極電圧  $60 \text{ V}$  以下では電荷量の和は変わらず、 $60 \text{ V}$  以上で減少する。

この電荷量の和は全イオン電流の減少が影響しており、原因は上記で述べたように、棒電極が生成する電界の影響が電

圧の増加に伴い大きくなり、イオナイザーとファラデーケージの結合部分などへイオンが捕集されたことと考えられる。

確認のため、以前の実験のようにイオナイザーから搬送されたイオン群をすべて捕集する構造のファラデーケージを取付け<sup>5)</sup>、ファラデーケージの構造以外すべて同じ条件で正・負イオンの電荷量測定を行った。このとき、正イオンのイオン電流は79.8 nA、生成時間は305.6 msであり、負イオンのイオン電流は74.3 nA、生成時間は278.4 msであった。イオン生成時間はファラデーケージの構造で大きく変わらないが、イオン電流に差が見られた。このイオン電流は Fig.4 で示す正・負イオンの飽和電流より大きい。正・負イオンの電荷量を計算するとそれぞれ24.4, 20.7 nCである。これも図7の値より大きくなった。

#### 4.3 イオン群の移動時間

イオン群がファラデーケージに進入する際の継手内でのエア流速とファラデーケージ内でのエア流速を、エア流量と断面積から推定する。継手の内径、ファラデーケージ内筒内径、棒電極直径はそれぞれ7, 30, 5 mm であるので継手内の断面積、ファラデーケージ内筒内の断面積はそれぞれ  $3.85 \times 10^{-5}$ ,  $6.87 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  となる。これとエア流量 85 L/min からエア流速を求めるとそれぞれ約36.8, 2.1 m/s となる。これよりファラデーケージ進入時は非常に高速なエア流れであり、その後ファラデーケージ内でエア流速が急激に減速すること、その過程で乱流になっていることが考えられる。

ここで、イオン電流波形の誘導電流波形はイオン群がファラデーケージ内に進入したときに立上り、内筒後方端に到達したときに誘導電流波形が終了し、定常状態に至ると仮定する。ファラデーケージ入口から内筒の後方端部までの距離は約70mmであり、図3の誘導波形発生時間は約10 msであったことから、ファラデーケージ内のイオン群の平均流速は約7 m/s となる。ここからもエア流速がファラデーケージ内で

減速していると考えられる。

#### 4.4 形成電界の数値解析

イオナイザーから注入されたイオン群はファラデーケージと棒電極によって形成された電界による力と空気流との合成された力によって運動する。今までの実験結果は棒電極に加えた電圧を変えることにより内部の電界強度が大きくなり、それによってイオン群が偏向され、その結果として正負イオン電流が変化した。この現象を定量的に説明するには、内部の電界分布と、空気流分布を知る必要があるが、空気流分布は非常に複雑であるので、第一段階として電界分布の推定を行った。

電荷密度  $\rho$  のイオン群の移動度が  $\mu$  のとき、その電流密度は次式で表される<sup>8)</sup>。

$$J = \rho(\mu E + w) \quad (1)$$

ただし、 $w$  は風速[m/s]である。この式で分かるように、 $\mu E$  と  $w$  は同じ速度の次元を持つから、ファラデーケージ内部の電界強度分布が分かれば速度の比較が可能となる。

棒電極の先端部の電界強度  $E_r$  を球座標での同心球モデルで近似して求める。この式は次のように表される。

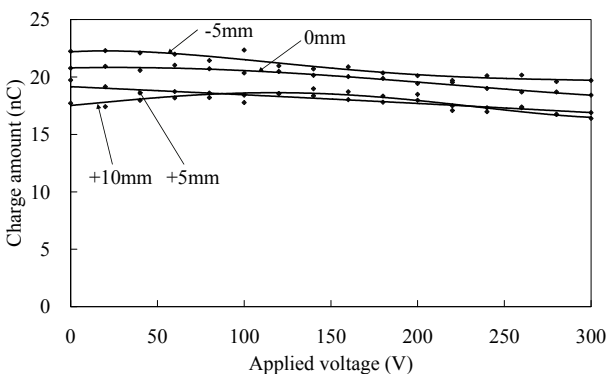
$$E_r = -\frac{ab}{a-b} \frac{V_0}{r^2} \quad (2)$$

ただし、 $a$ ,  $b$  は内球, 外球の半径,  $r$  は中心からの距離である。

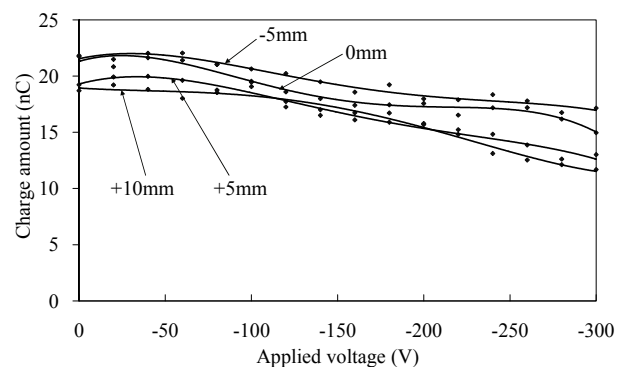
先端部から離れた部分での電界は近似的に、円筒座標での同軸円筒の電界強度  $E_r$  で表す。

$$E_r = \frac{V_0}{\ln c - \ln d} \frac{1}{r} \quad (3)$$

ただし、 $c$ ,  $d$  は内円筒, 外円筒の半径,  $r$  は中心軸からの距離である。



(a) Positive voltage.



(b) Negative voltage.

図7 印加電圧—捕集イオンの正・負電荷量合計値特性

Fig. 7 Dependency of the sum of charge amount of collected ion on applied voltage.

図8に示すモデルで差分法（FDM）を用いて電界計算を行った。このとき棒電極位置  $x=0$  mm, 印加電圧  $V_0=100$  V とし, 近似解析解では  $a=c=2.5$  mm,  $b=d=15$  mm とした。

図9より棒電極先端では球座標での解析解と  $z$  軸方向の電界で良い一致が見られた。また図10より棒電極円筒部分では, 円筒座標での解析解と  $r$  軸方向で位置が棒電極先端 R の中心部より 5 mm ファラデーケージ内側の位置で良い一致を示した。

同心球モデルで計算した場合の棒電極先端部の電界強度は,

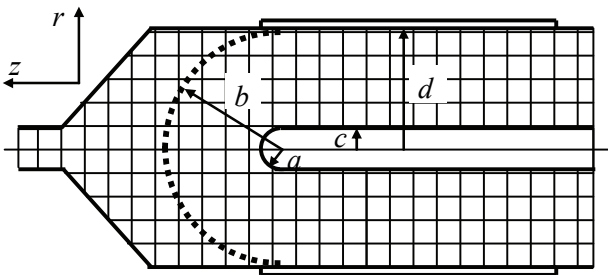


図8 電極の解析モデル  
Fig. 8 Analysis model of electrodes.

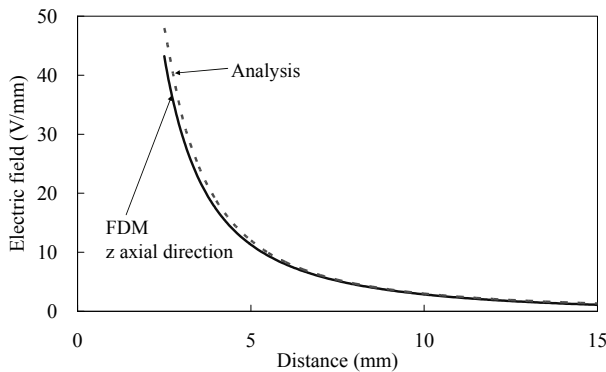


図9 FDM と球座標での解析解の比較  
Fig. 9 Comparison of FDM and analysis solution in spherical coordinates.

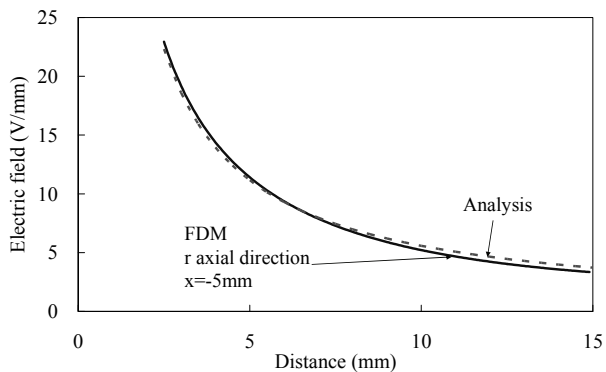


図10 FDM と円筒座標での解析解の比較  
Fig. 10 Comparison of FDM and analysis solution in a cylinder coordinates.

約 40 V/mm であるから移動度との積により, 電界によるイオンの速度は 8 m/s 程度と推定される。これは空気流の流速とほぼ同程度なので十分に偏向されることが説明できる。

### 5. おわりに

本研究より下記の6点が分かる。

- (1) ファラデーケージ内に挿入した棒電極による偏向電界で, 交流コロナの正・負イオン分離ができる。
- (2) 棒電極電圧と同極性のイオン電流は, 印加電圧とともに増加し, 逆極性のイオン電流は減少する。また, 同極性イオン電流は飽和する傾向にある。
- (3) 棒電極に電圧を印加しない場合, ファラデーケージでの捕集イオン量は棒電極位置で変化するが, 電圧印加時には, 同極性イオンの飽和電流値には棒電極の位置による差がない。
- (4) 負イオンの方が偏向電界の影響を受けやすい。
- (5) 正・負イオンの搬送量の合計は一定と考えられるが, 棒電極への印加電圧が増加すると, 正・負イオン電流の合計が減少した。これは, 測定部以外へイオンが捕集されたことを示すと考えられる。
- (6) ファラデーケージと棒電極によって形成された電界によるイオン流速の計算値は空気流の流速とほぼ同程度となったことから, 電界の力によって十分にイオン群が偏向, 捕集され得ると考えられる。

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: 2004 年静電気学会講演論文集, pp.193-198 (2004)
- 2) 清水 渡, 永田秀海, 和泉健吉, 児玉 勉: 静電気学会誌, **29** (2005) 62
- 3) A.Osawa: J.Electrostat., **65** (2007) 598
- 4) EOS/ESD Association Standard for Protection of Electrostatic Discharge Susceptible Items-Ionization, EOS/ESD-S 3.1-1991 (1991)
- 5) 深田佳成, 伊藤優希, 安川尚志, 八塚京子: 2008 年静電気学会春期講演論文集, pp.71-72 (2008)
- 6) K.Asano, Y.Fukada and T.Yasukawa: J.Electrostat., **66** (2008) 275
- 7) 電気学会編:「電気工学ハンドブック第6版」, オーム社, pp.484 (2001)
- 8) 静電気学会編:「新版静電気ハンドブック」, オーム社, pp.1009 (1998)