

論 文

コロナ放電による負イオンおよびオゾンの発生特性

太田 幸治*, 谷村 泰宏*, 中津川 直樹*, 池田 彰*

(1995年3月6日受理)

Characteristics of Production Rate of Negative Ions and Ozone
by Corona Discharge

Koji OHTA,* Yasuhiro TANIMURA,* Naoki NAKATSUGAWA*

and Akira IKEDA*

(Received March 6, 1995)

We have developed a compact negative ion generator with a DC corona discharge. It consists of a needle to metal plane electrode with a gap of 5 mm or 10 mm. We measured the production rate of negative ions and ozone of under voltages of between -12 to -2 kV, wind velocities of between 0.2 to 4.5 m/s and absolute humidities of between 6 to 12 g/kg. The following results were obtained; (1) The maximum output of negative ions was about 2×10^{10} ions/s with a gap of 10 mm and a voltage of -12 kV. The maximum output of ozone was 14 mg/hr with a gap of 5 mm and a voltage of -8 kV. (2) The output of negative ions increased in proportion to the 1.6 power of wind velocity. (3) The output of negative ions increased with increasing the absolute humidity. (4) It is useful to cover the ground electrode with a ceramics film, whose thickness was 0.5 mm, in the case of decreasing the output of ozone without decreasing the negative ion output. (5) We have found that the output of ozone increased in proportion to the discharge power but that of negative ions was saturated when it attained about 10^{-3} W.

1. 緒 言

イオン発生に関する研究は、比較的古くから行われており^{1,2)}、コロナ放電を応用した電気集塵装置による塵埃処理³⁾などがよく知られている。また、イオンは、クリーンルーム内における無塵率の向上や、機器やウェハなどの静電気障害を解消するための有効な方法として用いられている⁴⁻⁶⁾。

最近、筆者らは負イオンが食品などに付着した細菌やカビなどの微生物の増殖を防止するという新しい現象を見い出し、食品の鮮度維持への適用を検討している⁷⁾。

負イオンを利用する上で、その発生特性を知ることは重要である。いかにすれば発生する負イオン量を増加させることができるか、また、食品の鮮度維持への適用の際考慮すべき風速および湿度に対する依存性、オゾンの発

生量との関連性を明らかにする必要がある。

しかし、負イオンの研究については、濃度計等の測定原理および理論についての報告^{8,9)}がみられるものの、発生に関する定量的な研究は少なく、また、同時に発生するオゾンとの関連についての研究もほとんど見られない。そこで、本報ではDCコロナ放電を利用した小型の負イオン発生装置を作製し、これを用いて負イオンおよびオゾンの発生に及ぼす印加電圧、ギャップ長、風速、絶対湿度などの影響を調べた。また、コロナ放電時の放電電荷波形を測定し、平均放電電力と負イオンおよびオゾンの発生量の関係について考察した。

2. 実験装置および方法

図1に実験装置の概略図を示す。この装置は、イオン発生部と発生したイオン量を測定する測定部から構成した。イオン発生部は、イオン発生電極、直流高圧電源(MAXELEC UHX-15N)および、イオンを送出するファンからなる。

今回、イオン発生電極は針電極(材質:タングステン、直径0.2 mm、長さ10 mm)と対向する金属接地電極(材質:sus、長さ37 mm、幅15 mm、厚さ1 mm)か

キーワード：負イオン、オゾン、コロナ放電、発生特性、誘電体

* 三菱電機(株)中央研究所 (661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1)

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp., 1-1, Tsukaguchi-Honmachi 8-Chome, Amagasaki, Hyogo, 661 Japan

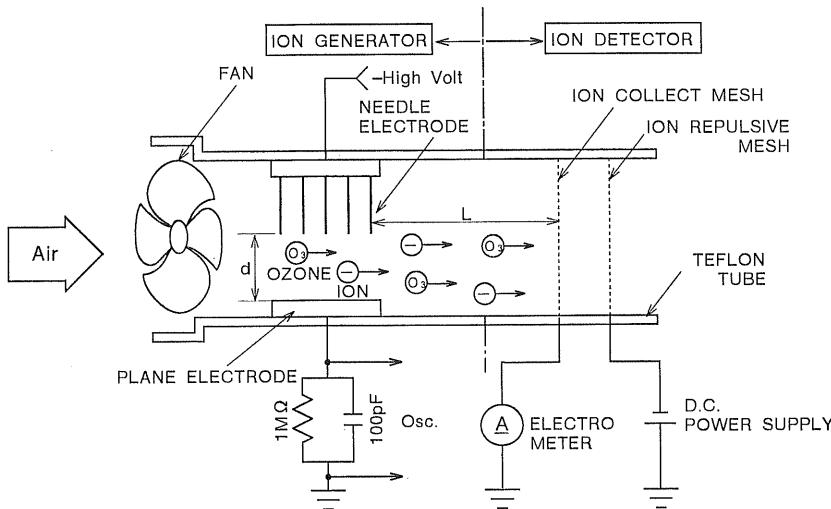


図 1 実験装置図

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment.

ら構成し、針電極に電圧を $-12 \sim -2$ kV まで印加した。この際、接地電極の影響を調べるために図2に示すタンクステンを厚さ 0.5 mm のセラミック誘電体で焼結した誘電体接地電極（大きさは金属平板と同様）を用いた場合についても実験した。

負イオンの測定は、自作したイオン測定器を用いた。この測定器は風路（材質：テフロン、直径 45 mm）、イオン捕集電極（材質：黄銅、16 メッシュ）、イオン反発電極（材質：黄銅、16 メッシュ）、微少電流計（ADVANTEST : TR8652）および直流安定化電源（菊水電子工業（株）：PAB32-3）から構成し、10 mm の間隔で対向させたイオン捕集電極とイオン反発電極を風の流れに対して垂直に設置した。ここで、イオン発生電極とイオン捕集電極の距離 L は 0.1 m とした。なお、発生した負イオンはイオン反発用電極に約 -100 V の電圧を印加することにより、ほぼ 100% 捕集することができた。

パルス放電領域の放電電荷波形は、波形測定時に接地電極側に 100 pF のコンデンサと $1\text{M}\Omega$ の抵抗を並列につなぎ、デジタルオシロスコープ（Tektronix : 2431L, 周波数帯域 300 MHz）により測定した。一方、無パルス放電領域の放電電流は、デジタルマルチメータ（ADVANTEST : TR6845）を用いて測定した。

このイオン測定器により測定した電流値、すなわち、イオン発生電極から 0.1 m 離れたところでのイオン電流を電荷量 e で除したものを、本実験ではイオン発生量として、(1)式より算出した。

$$n_{ion} = I/e \quad (1)$$

n_{ion} ：イオン発生量 [ions/s]

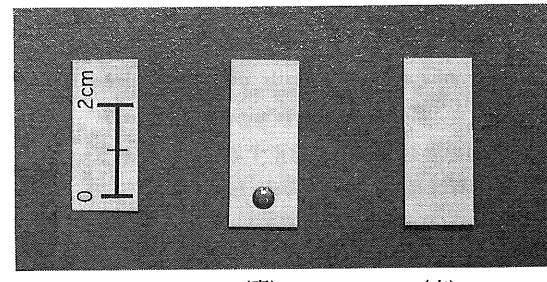


図 2 誘電体接地電極

Fig. 2 Dielectric ground electrode.

I ：イオン電流 [A]

e ：電子の電荷量 1.602×10^{-19} C

また、負イオン濃度は、(2)式より算出した。

$$C_{ion} = n_{ion} / (S \cdot v) \quad (2)$$

C_{ion} ：イオン濃度 [ions/m³]

S ：風路の断面積 [m^2]

v ：風速 [m/s]

一方、オゾン発生量は紫外線吸収方式のオゾン濃度計（サーモエレクトロン：model 49, 精度 ± 0.002 ppm）により測定したオゾン濃度 C_{O_3} と供給空気量 Q を用いて(3)式より算出した。

$$n_{O_3} = C_{O_3} \times Q \quad (3)$$

n_{O_3} ：オゾン発生量 [mg/hr]

C_{O_3} ：オゾン濃度 [mg/m³]

Q ：供給空気流量 [m^3/hr]

なお、実験期間中、原則として温度 $27^\circ\text{C} \pm 10\%$ 、湿度 $30\% \text{RH} \pm 10\%$ に維持した。また、風速は食品保存など

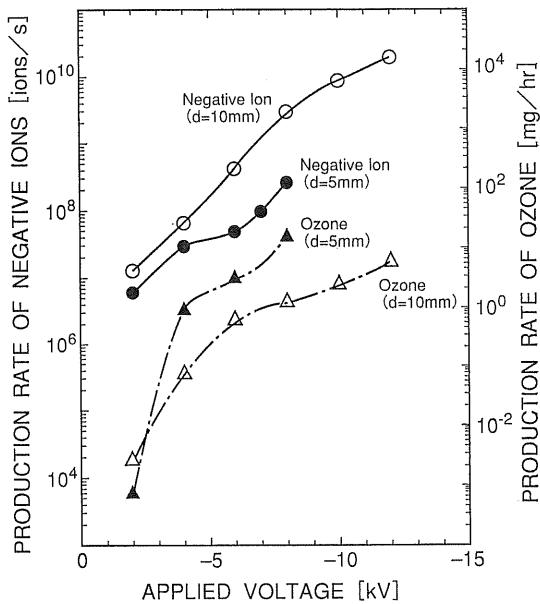


図3 針対金属平板における負イオンおよびオゾン発生特性

Fig. 3 Characteristic of production rate of negative ions and ozone with needle to plane electrode.

への適用を考え、乾燥を防止するため低風速とし、0.5 m/s (空気流量 $8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$) とした。

3. 結果および考察

3.1 印加電圧およびギャップ長の影響

図3は、針対金属平板電極の場合について、負イオン発生量およびオゾン発生量と印加電圧の関係をギャップ長をパラメータに調べたものである。なお、風速は0.5 m/s とした。

ギャップ長 $d=5$ および 10 mm について、印加電圧 $V=-12\sim-2\text{ kV}$ の範囲において印加電圧の絶対値増加に伴って負イオン発生量は増加し、ギャップ長 10 mm では、印加電圧 -12 kV において約 $2 \times 10^{10} \text{ ions/s}$ の値を示した。負イオン発生に及ぼすギャップ長の影響は、同一印加電圧では $d=10\text{ mm}$ の方が $d=5\text{ mm}$ の場合よりも発生量が増加する傾向が認められた。なお、ギャップ長の短い $d=5\text{ mm}$ の場合、印加電圧が約 -8 kV を超えると火花放電が発生し、これに伴うノイズのためイオン電流の検出が不可能となった。一方、オゾン発生量は、イオン発生の場合と異なり、ギャップ長が短い 5 mm の方が発生量が多くなり、印加電圧の絶対値が最大である -8 kV において約 14 mg/hr の最大値を示した。このように、負イオン発生量は同一印加電圧ではギャップ長が小さくなると減少するのに対し、オゾン発

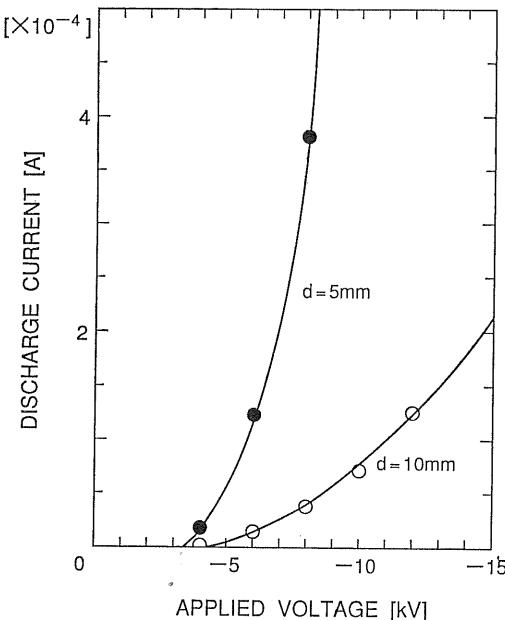


図4 印加電圧と放電電流の関係

Fig. 4 Relationship between applied voltage and discharge current.

生量は増加する傾向が認められた。

このようなイオン発生量の減少は、接地電極に流れる放電電流が増加することと関係があると思われる。図4は、ギャップ長 d が 5 mm および 10 mm での放電電流を測定した結果を示したものである。放電電流は、 $d=5\text{ mm}$ の方が $d=10\text{ mm}$ の場合の数十倍に増加するものが認められた。このように、ギャップ長が 5 mm と短くなると、電界強度が増し、生成された電子および負イオンが接地電極へ流れ、ファンにより空間(イオン測定器方向)に取り出される量が減少するものと思われる。一方、オゾンはギャップ長が短いほど電子エネルギーが大きくなり、オゾン生成量が増加するものと考えられる。

3.2 風速の影響

図5は、負イオン発生量に及ぼす風速 v の影響を示したものである。ここで、放電条件は、 $V=-8\text{ kV}$ および $d=10\text{ mm}$ とした。なお、風速は、選定したファンの能力により $0.5\sim4.5\text{ m/s}$ とした。図5の結果を最小二乗法を用いて式化(相関係数 99.5%)すると(4)式で表され、負イオン発生量は風速 v の 1.6 乗に比例する結果になった。

$$I/e = 22.5 v^{1.6} \quad (4)$$

以上のように、印加電圧 -8 kV 、ギャップ長 10 mm 、風速 $0.5\sim4.5\text{ m/s}$ の範囲において、イオン発生量は風速の増加にともないべき乗に比例して増加することが認

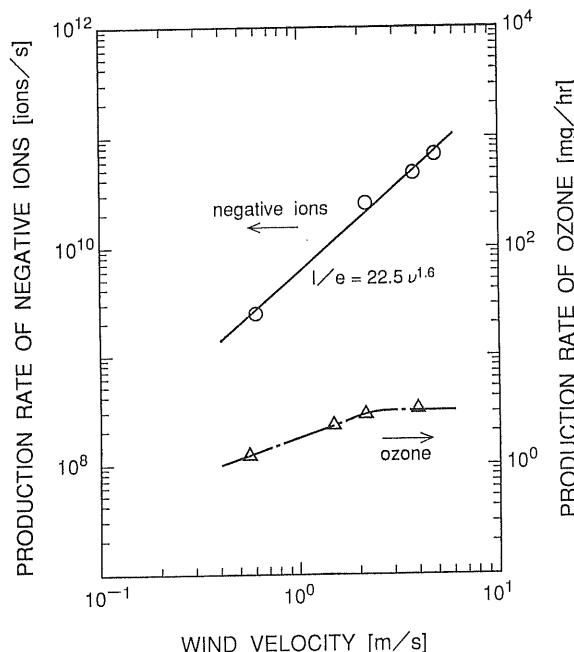


図 5 負イオン発生の風速依存性

Fig. 5 Relationship between wind velocity and production rate of negative ions.

められた。一方、オゾン発生量と風速の関係は、図 5 に示すとおり、風速の上昇により発生量がやや増加し、その後飽和する傾向を示した。一般に、オゾン濃度は放電電力 W と供給空気量 Q の比 W/Q により一義的に表される¹⁰ことが知られているが、今回の実験ではオゾン発生量の風速に対する依存性は負イオンの場合に比べて少ない結果となった。

3.3 湿度の影響

図 6 は、負イオン発生量に及ぼす絶対湿度の影響を示したものである。なお、放電条件は、印加電圧 -8 kV およびギャップ長 10 mm とした。湿度は超音波方式の加湿器を用いて調節した。なお、この湿度は、デジタル式温・湿度計 (Delta; Model SK-80TRH) により相対湿度を測定し、湿り空気線図¹¹⁾により絶対湿度をもとめた。また、温度は、ほぼ 27°C 一定であった。

すでに、空気原料の相対湿度が高いほどイオン発生器より放出されるイオン量が増加すると報告されている^{12,13)}。今回の実験においても、約 0.01 kg/kg 以下では、負イオン発生量は、絶対湿度の増加に伴い増加したが、その後、飽和する傾向が見られた。このように、絶対湿度が 0.01 kg/kg 以下の低湿度において負イオン発生量は湿度の増加に伴って増加する傾向が認められた。空気中の負イオン生成には、酸素や水蒸気などが関与

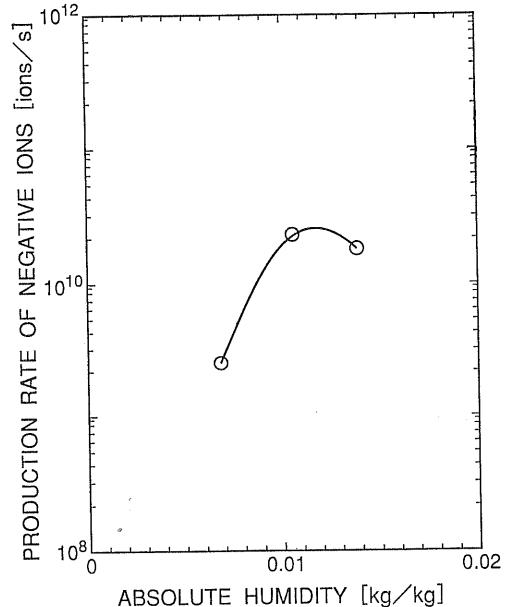


図 6 負イオン発生の湿度依存性

Fig. 6 Relationship between absolute humidity and production rate of negative ions.

し^{14,15)}、そのメカニズムは複雑であると思われる。

今回の実験で、食品鮮度維持によく用いられる高湿度の場においてもその発生量が維持できる可能性が見いただされた。

3.4 接地電極の影響

イオン発生電極として針対金属接地電極を用いた場合、著しい不平等電界のため火花放電がおこりやすい。そこで、接地電極をセラミックで覆い火花放電をおこりにくくしたときの負イオンおよびオゾンの発生特性を図 7 に示す。なお、ギャップ長は 10 mm 、風速は 0.5 m/s とした。

負イオン発生量は、印加電圧 V が -8 kV までは針対金属接地電極の方が誘電体接地電極より発生量を上回ったが、その後逆転し、誘電体接地電極の方が発生量が上回る傾向を示した。このように、今回用いた誘電体接地電極では、針電極に直流負高電圧を印加した場合、金属接地電極とほぼ同様の負イオン発生量が得られた。一方、オゾン発生量は誘電体接地電極の方が著しく低くなるという結果が得られた。これらの傾向は、図 8 に示したようにギャップ長が 5 mm の場合もほぼ同様であった。

図 9 は、針対金属接地電極における放電電荷波形を示したものである。金属接地電極では、印加電圧が -3 kV

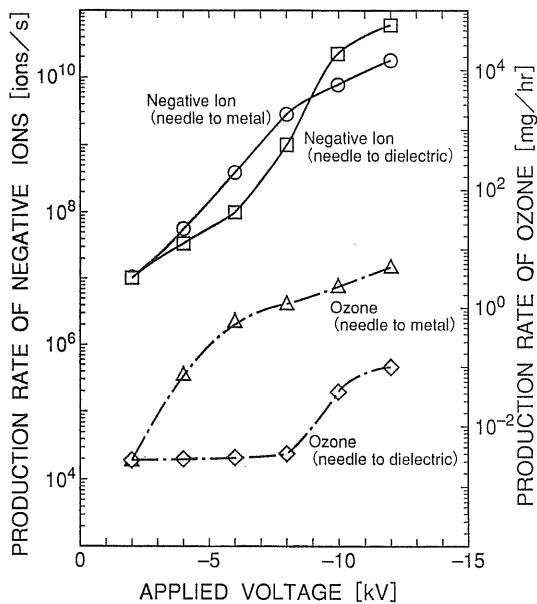
図 7 針対金属電極と針対誘電体電極との比較 ($d=10$ mm)

Fig. 7 Production rate of negative ions and ozone with needle to metal plane electrode ($d=10$ mm).

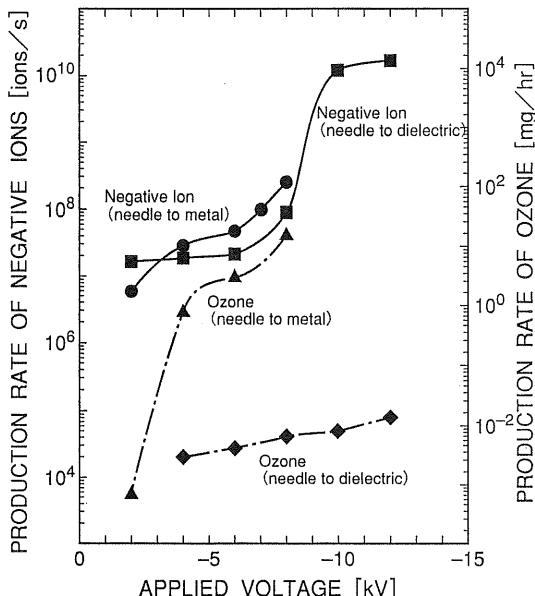
図 8 針対金属電極と針対誘電体電極との比較 ($d=5$ mm)

Fig. 8 Production rate of negative ions and ozone with needle to metal plane electrode ($d=5$ mm).

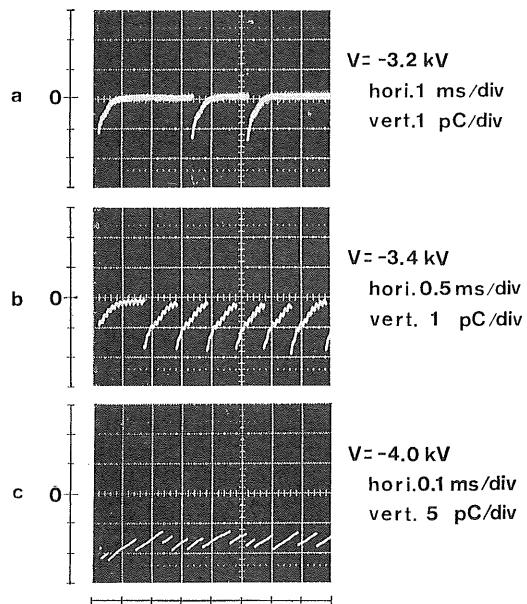


図 9 放電電荷波形 (針対金属平板電極)

Fig. 9 Wave shape of electric discharge (needle to metal plane electrode).

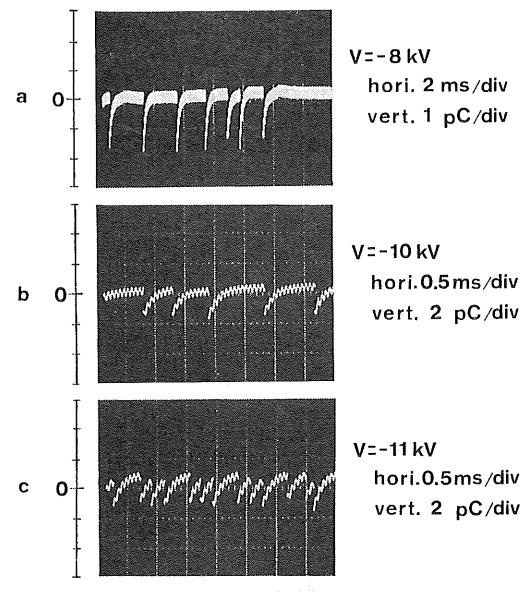


図 10 放電電荷波形 (針対誘電体平板電極)

Fig. 10 Wave shape of electric discharge (needle to dielectric plane electrode).

付近で放電に対応するパルス波形が表れ、 -4 kV 以上の絶対値を印加すると連続的な放電に移行し、DC 成分の増加（ベースラインのマイナス側へのシフト）が認められた。また、ギャップ長が 5 mm と短いときには 10 mm の場合よりも絶対値が小さい電圧で連続的な波形に移行するのがみられた。一方、誘電体接地電極では、図 10 に示したように、金属電極の場合よりも絶対値が大きい電圧（約 -8 kV ）でパルス波形がみられるという結果となった。このパルスの原因はトリチエリパルスと思われる。しかし、 -8 kV 付近ではトリチエリパルスより低い周波数（ 500 Hz 以下）の放電が不規則にみられ、さらに詳細な検討が必要である。また、 -11 kV の電圧を印加した時でも、金属接地電極の場合と異なり、パルスの認められる周期幅が短くなるものの、DC 成分の増加は認められなかった。さらに、図 11 は、負イオン発生量およびオゾン発生量と平均放電電力の関係を示したものである。ここで、平均放電エネルギー D_E および平均放電電力 W はそれぞれ、(5) および (6) 式より算出した。

$$D_E = (1/2)q_a \cdot V \times 10^{-3} \quad (5)$$

$$W_a = D_E \cdot f \quad (6)$$

D_E : 平均放電エネルギー [J]

q_a : 平均放電電荷量 [C]

V : 印加電圧 [kV]

W_a : 平均放電電力 [W]

f : 放電電荷波形繰り返し周波数 [Hz]

図 11 に示すように負イオン発生量およびオゾン発生量は、平均放電電力によりほぼ一義的に表された。負イオン発生量は、平均放電電力の増加に伴い増加するが、 10^{-3} W 付近で飽和する傾向を示した。この理由については、今後の詳細な検討が必要であるが、負イオンの空間制限電荷効果によるものと思われる。一方、オゾンの発生量は、放電時の放電電力に強く依存し、平均放電電力の増加に伴いほぼ比例的に増加した。金属接地電極と誘電体接地電極で放電電荷波形が大きく異なること、平均放電電力が 10^{-3} W 付近でイオン発生量が飽和することなど今後の詳細な検討が必要であるが、コロナ放電による負イオン発生量およびオゾン発生量は電圧、ギャップ長および接地電極の材質などと関連なく平均的な放電電力で一義的に表される傾向が認められた。

4. 結 言

針電極と金属接地電極のギャップ長を 5 mm および 10 mm とした DC コロナ放電による小型の負イオン発生装置を試作した。これを用いて、印加電圧 $-12\sim-2\text{ kV}$ 、風速 $0.5\sim4.5\text{ m/s}$ 、湿度 $6\sim12\text{ g/kg}$ の条件にお

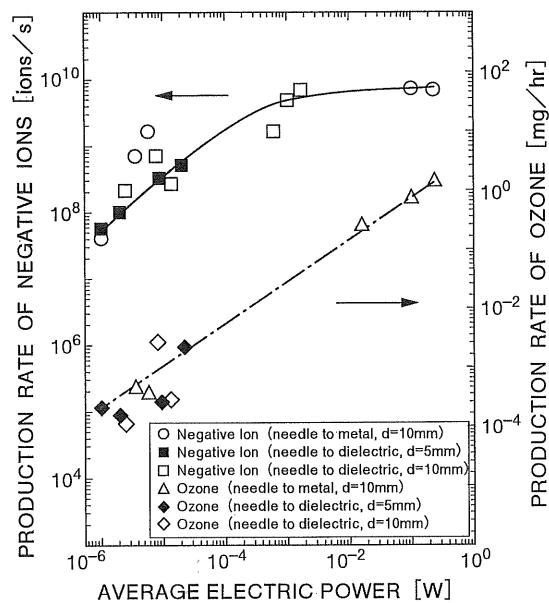


図 11 放電電力と負イオンおよびオゾン発生量の関係

Fig. 11 Production rate of negative ion and ozone as a function of discharge power.

いて、負イオンおよびオゾンの発生特性を調べた。また、コロナ放電時の放電電荷波形を測定し、放電電力と負イオンおよびオゾンの発生量の関係について考察した。その結果、次の諸点が明らかになった。

- (1) 負イオン発生量は、ギャップ長 10 mm 、印加電圧 -12 kV において、約 $2 \times 10^{10}\text{ ions/s}$ の最大値を示した。一方、オゾン発生量は、ギャップ長 5 mm 、印加電圧 -8 kV において、約 14 mg/hr の最大値を示した。
- (2) ギャップ長 10 mm 、印加電圧 -8 kV 、風速 $0.5\sim4.5\text{ m/s}$ の範囲において、負イオン発生量は風速の 1.6 乗に比例する実験結果が得られた。一方、オゾン発生量に及ぼす風速の影響は、負イオンの場合に比べて少なかった。
- (3) 絶対湿度 $6\sim12\text{ g/kg}$ の範囲において、負イオンの発生量は絶対湿度の増加に伴い増加し、絶対湿度が約 10 g/kg で飽和する傾向を示した。
- (4) 金属接地電極をセラミック（厚さ 0.5 mm ）で被覆した場合、負イオン発生量は金属接地電極に比べてほとんど低下せず、オゾン発生量が著しく低下する現象が認められた。この際、放電電荷波形はギャップ長 10 mm の場合、印加電圧が約 -8 kV 付近でパルス波形が生じ、 -11 kV まで印加電圧を上昇しても接地電極に流れる放電電流の増加は認められなかった。
- (5) 放電電荷波形から求めた平均電力と負イオン発生量およびオゾン発生量の関係を調べた。その結果、負イオ

ノ発生量およびオゾン発生量は、電圧、ギャップ長、接地電極の材質などに関係なく、平均放電電力で一義的に表される傾向が認められた。オゾン発生量は放電電力にほぼ比例的に増加したが、イオン発生量は本実験条件の範囲において 10^{-3} W 付近で飽和する傾向を示した。

本論文を作成するにあたり御指導頂きました三菱電機(株)生産技術センター田中正明博士に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K.T. Whitby : Rev. Sci. Inst., 32 (1961) 1351
- 2) O.M. Stuetzer : Rev. Sci. Inst., 32 (1961) 16
- 3) 酒井 正 : 空気清浄, 4 (1966) 35
- 4) 鈴木政典, 山路幸郎 : 空気清浄, 26 (1989) 48
- 5) 阪田総一郎, 岡田孝夫 : 静電気学会誌, 15 (1991) 134
- 6) T. Sebald and H.H. Stiehl : 9th ICCCS Proceedings 1988, p. 318, Inst. Env. Sci. (1988)
- 7) 谷村泰宏, 中津川直樹, 池田 彰, 田中正明 : 静電気学会講演論文集'93, p. 211, 静電気学会 (1993)
- 8) N.L. Allen and Y. Teisseire : J. Phys. D, 16 (1983) 2485
- 9) G.C. Acord, P.D. Pedrow and Q.Y. Wang : IEEE Trans. Pow. Del., 4, No. 3 (1989) 1823
- 10) 電気学会編 : 放電ハンドブック, p. 269, 電気学会 (1989)
- 11) (社)空気調和・衛生工学会 : 空気調和設備の実務の知識, p. 291, オーム社 (1986)
- 12) 三浦豊彦 : 労働科学, 41 (1965) 269
- 13) 増井典明, 村田雄司 : 静電気学会講演論文集'91, p. 7, 静電気学会 (1991)
- 14) 静電気学会編 : 静電気ハンドブック, p. 316, オーム社 (1981)
- 15) 竹田 進 : 気体放電の基礎, p. 45, 東京電機大学出版局 (1990)