

## 論 文

## 同心球空気コンデンサの電荷漏洩

葛 良\*, 藤 林 宏 一\*, 松 井 満\*  
 村 崎 憲 雄\*\*, 山 下 幸 一\*\*\*

(1994年4月8日受理)

## Electric Charge Leakage from a Concentric Spherical Air Condenser

Ziliang GE,\* Koichi FUJIBAYASHI,\* Mitsuru MATSUI,\*  
 Norio MURASAKI\*\* and Koichi YAMASHITA\*\*\*

(Received April 8, 1994)

At an electric field, whose intensity is a tenth to a fifth of the dielectric breakdown strength of the air, electric charge leakage from a concentric spherical air condenser has been studied. An outer spherical metal shell has been earthed and an inner metal sphere has been initially charged. Measuring the decay of the sphere potential, it has been found that the electric charge leaks very slowly. Electric charge leakage can arise from two factors, they are an electric current flowing through insulators which support the inner sphere, and an electric charge neutralization due to charged particles in the air. The purpose of this paper is to calculate separately the leakage current through the insulator and electric conduction through the air. Two kinds of time constants due to two factors of charge leakage can be estimated separately, after the measurement of charge-decaying-time constants for varied numbers of supporting strings. It has been found that the intensity of the leakage current through the air is a ten times of that of the electric conduction current through the insulators. As a result, the electric charge leakage is mainly caused by electric charge neutralization due to charged particles in the air. The density of leakage current is not exceed over  $10^{-17} \text{ A/cm}^2$ . The decay of positive charge is faster than that of negative charge. The charge leakage dependent on the polarity, can be well explained by a difference between the areas of two negative electrodes. As the conclusion, the electric conduction through the air at a moderate strong electric field, whose intensity is a tenth to a fifth of the dielectric breakdown strength of the air, has proved to be dominant.

**キーワード:** 電荷漏洩, 漏れ時定数, 漏れ電流, 荷電粒子, 電荷の中和

\* 東京農工大学工学部電子情報工学科 (184 小金井市中町 2-24-16)

Department of Electronic and Information Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei, Tokyo, 184 Japan

\*\* 帝京大学理工学部電気電子システム工学科 (320 宇都宮市豊郷台 1-1)

Department of Electrical and Electronic System Engineering, School of Science and Technology, Teikyo University, 1-1, Toyosatodai, Utsunomiya, 320 Japan

\*\*\* 東京電気株式会社技術研究所 (411 三島市南町 6-78)  
 Institute of Technology, Tokyo Electric Co., Ltd., 6-78, Minamicho, Mishima, Shizuoka, 411 Japan

## 1. ま え が き

合成高分子材料は電気絶縁材料として広く使用され, 一般に極めて高い抵抗率を持ち, その漏れ電流も極めて小さい。また, 一度帯電すると, 電荷は長時間にわたり消滅しない性質がある。現在は, 表面抵抗率と電荷量半減期と摩擦帶電量との三つの指標を用いて固体絶縁物の静電特性が総合評価されている<sup>1)</sup>。ところで, 空気の絶縁破壊電界強度は  $3 \times 10^6 \text{ V/m}$  以上である。今まででは, 空気の絶縁破壊電界強度以下の電界では, 空気中の電荷漏洩を無視している。ところが, 使用される絶縁材料の表面抵抗率が向上すると, 空気の絶縁破壊強度の  $1/10 \sim 1/5$  の程度の大きさの電界でも, 合成高分子材料の電荷量半減期などを測定する時に, 空気中の電荷漏洩が無視できないおそれがある。そこで, こういう材料の静

電特性を評価する際、空気を経由する漏れ電流を再検討する必要がある。

ところで、空気の湿度は帯電体表面電荷の空気中への漏洩に大きな影響をもたらす<sup>2)</sup>。現今では、空気の湿度は制御可能である。空調室中で相対湿度の変化分を±5%以内に制御できる。長時間安定に測定できる高感度の電界計も存在する。市販の最高精度の電界計は12時間稼働における指示の変動は1%未満である<sup>3)</sup>。したがって、空気中の電荷漏洩を精密に測定することが可能となった。

本研究の目的は、高電圧印加時における絶縁物を介在した漏洩電流と空気中を通る漏れ電流とを分離して測定することである。

同心球空気コンデンサの内球に電荷を与える、内球の電位の経時変化を測定することにより電荷量の変化を観察すると、ゆっくりではあるが、電荷は漏洩することがわかる。電荷の漏洩は内球の支持物を経由する成分と空気中の荷電粒子により中和される成分からなる。電荷漏洩速度を測定することにより、二つの漏洩成分を分離推算して、孤立帶電導体球の電荷漏洩の主な原因を明らかにした。

## 2. 測 定 原 理

内球に一定の電荷を与えて電荷減衰を測定する際、同心球空気コンデンサの漏れ電流  $I_{\text{leak}}$  は空気を経由する漏れ電流  $I_{\text{air}}$  と内球の吊り糸を経由する漏れ電流  $I_{\text{ins}}$  からなる。すなわち、

$$I_{\text{leak}} = I_{\text{air}} + I_{\text{ins}} \quad (1)$$

また、内球の初期帶電量  $Q_0$  と内球の初期電位  $U_0$  との間には次の関係がある。

$$Q_0 = CU_0 \quad (2)$$

ここに、 $C$ は同心球空気コンデンサの静電容量である。

内球の帶電量  $Q$  とすると、電荷量の変化は次式に従う、

$$Q = Q_0 \{1 - \exp(-t/T_{\text{leak}})\} \quad (3)$$

ここに、 $T_{\text{leak}}$ ：電荷漏洩時定数。

同心球空気コンデンサの漏れ電流  $I_{\text{leak}}$  は

$$\begin{aligned} I_{\text{leak}} &= \frac{dQ}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} [Q_0 \{1 - \exp(-t/T_{\text{leak}})\}] \\ &= \frac{Q_0}{T_{\text{leak}}} \exp(-t/T_{\text{leak}}) \\ &= \frac{CU_0}{T_{\text{leak}}} \exp(-t/T_{\text{leak}}) \end{aligned} \quad (4)$$

電荷はきわめて緩慢に漏洩するので、内球電位の経時変化を測定する時間  $t$  は一般に  $t \ll T_{\text{leak}}$  である。そこで、上式において  $t/T_{\text{leak}} \approx 0$  とおくと、

$$I_{\text{leak}} \approx CU_0/T_{\text{leak}} \quad (5)$$

となる。同様に、

$$I_{\text{air}} \approx CU_0/T_{\text{air}} \quad (6)$$

$$I_{\text{ins}} \approx CU_0/T_{\text{ins}} \quad (7)$$

ここに、 $T_{\text{air}}$  は空気による電荷漏洩時定数、 $T_{\text{ins}}$  は吊り糸による電荷漏洩時定数。上述の三つの式を(1)式に代入すると、

$$1/T_{\text{leak}} = 1/T_{\text{air}} + 1/T_{\text{ins}} \quad (8)$$

になる。

すなわち、時定数の逆数は和の法則に従う。

吊り糸1本による電荷漏洩時定数を  $T_{\text{str}}$  とすると、

(8)式より  $l$  本吊りでは、

$$1/T_{\text{leak}}(l) = 1/T_{\text{air}} + l/T_{\text{str}} \quad (9)$$

$m$  本吊りでは、

$$1/T_{\text{leak}}(m) = 1/T_{\text{air}} + m/T_{\text{str}} \quad (10)$$

ここで、 $l > m$  とし、 $T_{\text{leak}}(l)$ 、 $T_{\text{leak}}(m)$  の値をそれぞれ測定すれば、(9)、(10)式より  $T_{\text{air}}$  と  $T_{\text{str}}$  を分離して推算できる。すなわち、

$$T_{\text{air}} = (l-m)/\{l/T_{\text{leak}}(m) - m/T_{\text{leak}}(l)\} \quad (11)$$

$$T_{\text{str}} = (l-m)/\{1/T_{\text{leak}}(l) - 1/T_{\text{leak}}(m)\} \quad (12)$$

## 3. 実 験 方 法

実験は温度 20~24°C、湿度 35±5% RH に保った空調室内において、図1のような装置を用いて行った。同心球空気コンデンサは内球と外球を銅で製作した。内球の外側半径は 62.5 mm である。外球の内側半径は 149 mm、球殻の厚さは 1 mm である。外球は上下二つの分割半球を組み合わせてある。同心球空気コンデンサの静電容量は 12 pF である。内球を釣り用のポリエチレンレフターレー釣糸 2 号（直径 0.235 mm）を 3 本用いてつるした。穴明き円板ゲージと長さゲージを用い、吊糸の長さをギターマシンヘッドで調節して、内球を同心位置に設定した。上側半球の開口部に黄銅製の蓋を設けた。この蓋を一時的に外して、高電圧電極を用いて内球に電荷を与えた。

高電圧電極を内球に一時接触させ、引き離す際には、内球の電位が低下することが判明した。図2(a)に、高電圧電極を内球に一旦接触させた後に、少し離した状態を示す。図2(b)に、高電圧電極を内球から著しく離した場合を示す。ここでは、内球表面では電気力線はより均一に分布する。内球から出る電気力線の数は一定であるが、図2(a)では、高電圧電極から出る電気力線が内球から出る電気力線を押しつけるため、電気力線密度は高電

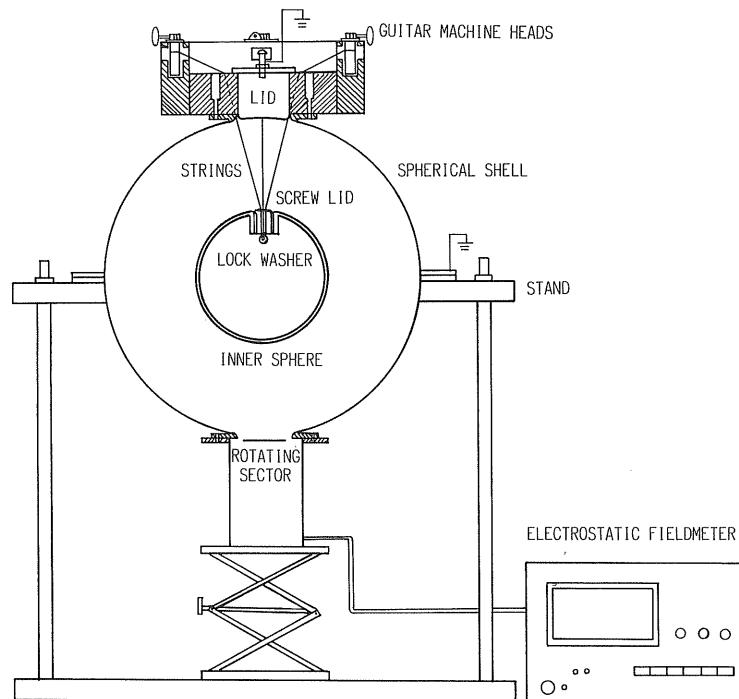


図 1 実験装置

Fig. 1 Experimental apparatus.

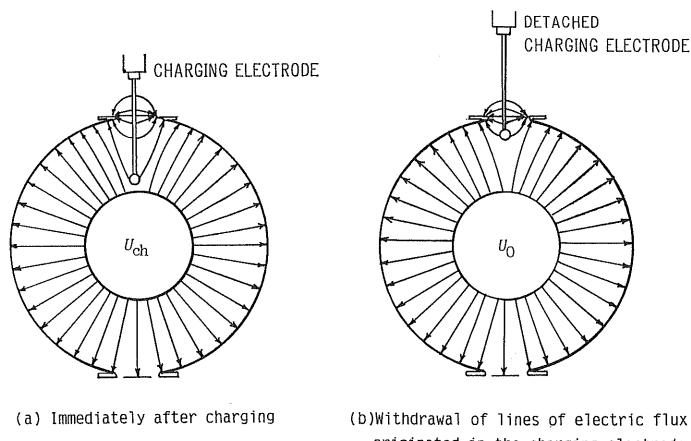


図 2 同心球コンデンサ充電時の電気力線のようす

Fig. 2 Equivalent capacity diminished by the withdrawal of lines of electric flux originated in the charging electrode.

圧電極が内球から著しく離した場合よりも高くなっている。したがって、図 2(b)に示す孤立導体球の電位  $U_0$  は、図 2(a)に示す充電直後の内球電位  $U_{ch}$  より低い。実測によると、 $U_0$  は  $U_{ch}$  より 1.4% ほど低い。

高電圧電極を内球に接触させてから離すと、内球の電位の低下のために、高電圧電極と内球との間で放電が生

じ、わずかな電荷量であるが、内球が再充電され、内球の初期電荷が変動することがあった。そこで、高電圧電極に、高抵抗  $100 \text{ M}\Omega$  を内蔵させて、内球再充電を防止した。図 3 に高電圧電極を示す。

下側半球の開口部に円環状のガード電極をとりつけた。ガード電極の円形の開口部の直径は 50 mm で、辺

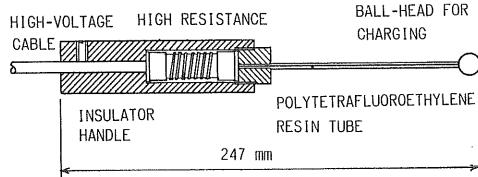


図3 高電圧電極

Fig. 3 Ball-headed charging electrode with current limiter for prevention of recharging.

縁を R5 に丸め、そこに回転セクター型電界強度計（リオン EA-07A）の検出部を置いた。電界計の出力信号を  $x-t$  レコーダで記録した。外球および蓋と電界計を接地して内球を遮蔽した。

実験に使用した回転セクタ型電界計および記録計の長時間安定度を以下のようにして検定した。

まず、ウェストン飽和型標準電池（富士電気化学）によるオペアンプ（LM356）を接続した標準定電圧源を用意した。標準定電圧源の出力電圧を記録計（横河電機 3201 型 2 チャンネル、3066 型 2 チャンネルおよび LER-12 型 1 チャンネル各 1 台、東亜 EPR-200A 型 2 チャンネル 1 台、合計 7 チャンネル）に加え、12 時間にわたって同時に稼働させ、記録の安定度を調べた。ドリフトは 0.1 % 以下であった。

次に、電界計の取扱説明書に従って製作した校正用電極（ステンレス鋼板：板厚 1 mm、ポリアセタール樹脂絶縁碍子）を 4 台の電界計の前方にそれぞれ配置し、高電圧直流電源（FLUKE 412B 型）を使用して電圧を印加し、電界強度を 12 時間にわたって測定し、上記記録計の四つのチャンネルを用いて指示の安定度を調べた。同時に、高電圧直流電源の出力電圧を三つのチャンネルで記録した。高電圧直流電源出力電圧の変動は 0.1% 以下であった。電界計の指示の変動はいずれも 0.1% 以下

であった。実測によると、電界計の感度は 1 V/cm であった。

内球にそれぞれ正または負極性の 10 kV, 13 kV, 15 kV, 18 kV と 20 kV の高電圧を瞬時印加し、内球の電位を電界強度計で測定し、 $x-t$  レコーダに出力させることにより減衰特性を測定した。

内球の表面、外球の内壁、ガード電極にちりが付着すると、電荷減衰が著しいので、ちりの付着を極力減らすよう隨時エタノール含浸綿ガーゼで清拭した。

#### 4. 実験結果および検討

##### 4.1 電荷漏洩の主な原因

同じ実験装置を 4 組用意して、内球を正帯電、負帯電とする各々 2 組に分けた。内球を吊る糸は 3 本で十分であるが、吊り糸による電荷漏洩を調べるために、各組には内球を吊る糸を 3 本と 30 本使い、吊り糸の本数による電荷の減衰速度の違いを比較した。それぞれの内球に正電荷あるいは負電荷を与えて、四つの内球の電位減衰を同時に測定する。

内球を正または負の 15 kV で帯電し、初期電位を  $U_0$  ( $U_0 \neq 15$  kV)、 $t$  秒後の電位測定値を  $U$  とすると、漏れ時定数は次式の近似式によって求められる。

$$\begin{aligned} U &= U_0 \exp(-t/T_{\text{leak}}) \\ &\approx U_0(1-t/T_{\text{leak}}) \\ T_{\text{leak}} &\approx t/(1-U/U_0) \end{aligned} \quad (13)$$

上式を使って漏れ時定数  $T_{\text{leak}}$  (3) と  $T_{\text{leak}}$  (30) を測定して (11) および (12) 式により、 $T_{\text{air}}$  と  $T_{\text{str}}$  を分離推算する。電荷漏れ時定数の実測値と分離推算値を表 1 にまとめた。表 1 から次のことがわかる。

(1)  $T_{\text{air}}$  の値は  $T_{\text{str}}$  の 4% ぐらいで、 $T_{\text{ins}}$  (3) より 1 枝小さい。したがって、空気中の荷電粒子による電荷の中和が電荷漏洩の主な原因だということがわかる。す

表 1 帯電球（半径 62.5 mm）の電荷漏れ時定数（印加電圧：15 kV）

Table 1 Charge-decaying-time constants [s] (radius : 62.5 mm, applied voltage : 15 kV).

Positively charged				Negatively charged			
$T_{\text{leak}}$ (3)	$T_{\text{leak}}$ (30)	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$	$T_{\text{leak}}$ (3)	$T_{\text{leak}}$ (30)	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$
$2.94 \times 10^6$	$1.74 \times 10^6$	$3.18 \times 10^6$	$11.5 \times 10^7$	$3.02 \times 10^6$	$1.90 \times 10^6$	$3.23 \times 10^6$	$13.8 \times 10^7$
2.61	1.13	3.05	5.38	2.08	1.13	2.29	6.68
3.66	1.29	4.60	5.38	3.87	1.48	4.72	6.47
3.82	1.98	3.70	11.1	4.38	2.63	4.73	17.8
3.53	1.73	3.99	9.16	3.40	0.701	5.95	2.39
3.58	1.27	4.49	5.31	3.63	1.79	4.10	9.52
3.19	2.13	3.38	17.3	3.26	1.71	3.62	9.71
Average :		$3.77 \times 10^6$	$9.30 \times 10^7$	Average :		$4.09 \times 10^6$	$9.48 \times 10^7$

なわち、高電圧を印加した帶電球は異符号の荷電粒子を強く引きつけて中和して電荷を失う。

(2) 正、負両帶電球の電位減衰特性には極性による差異がある。 $T_{\text{air+}} < T_{\text{air-}}$ 、正帶電のほうが、負帶電より速く電位が減衰する。

#### 4.2 空気を経由する漏れ電流

空気中の荷電粒子により中和して失われた内球の電荷量を  $\Delta Q$  とすると、中和に寄与した荷電粒子数  $N$  は

$$\begin{aligned} N &= \Delta Q/e \\ &= (Q_0 - Q)/e \\ &= Q_0 [1 - \exp(-t/T_{\text{air}})]/e \\ &= CU_0 [1 - \exp(-t/T_{\text{air}})]/e \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 $e$  は電気素量、内球に正または負 15 kV の電圧を印加すると、 $|Q_0| = 1.77 \times 10^{-7}$  C.

上式を  $t$  に関して微分すると、

$$N' = \frac{dN}{dt} = \frac{CU_0}{eT_{\text{air}}} \exp(-t/T_{\text{air}}) \quad (15)$$

帶電した後の内球電位の減衰特性はほぼ直線である。かつて、実験時間  $t \ll T_{\text{air}}$  であるので、上式において  $t/T_{\text{air}} \approx 0$  とおくと、実験中毎秒の中和に寄与した荷電粒子数  $N'$  を近似して求め得る。表 1 に示す  $T_{\text{air}}$  の値を用いて計算すると、

内球正帯電： $N'_+ = 2.93 \times 10^5$  個/s。

内球負帯電： $N'_- = 2.71 \times 10^5$  個/s。

$N'_+ > N'_-$ 、すなわち、正電荷は負電荷より漏洩が速い。

高電圧を印加した帶電球は異符号の荷電粒子を引きつけて中和して電荷を失う。このことは、空気中へ電流が流れることに相当する。それゆえ、空気を経由する漏れ電流  $I_{\text{air}}$  は

$$\begin{aligned} I_{\text{air}} &= \frac{dQ}{dt} = \frac{CU_0}{T_{\text{air}}} \exp(-t/T_{\text{air}}) \\ &\approx eN' \end{aligned} \quad (16)$$

すなわち、

内球正帯電： $I_{\text{air+}} = 4.69 \times 10^{-14}$  A.

内球負帯電： $I_{\text{air-}} = 4.30 \times 10^{-14}$  A.

帶電球の近傍の電流密度は

$$i_a = I_{\text{air}} / 4\pi a^2 \quad (17)$$

ここに、 $a$  は内球の半径。すなわち、

内球正帯電： $i_{a+} = 9.56 \times 10^{-17}$  A/cm<sup>2</sup>.

内球負帯電： $i_{a-} = 8.76 \times 10^{-17}$  A/cm<sup>2</sup>.

電流はきわめて少なく、その数値は文献 4) の記載値と一致する。

内球に印加される高電圧の値をそれぞれ正または負の 10 kV, 13 kV, 18 kV, 20 kV に変えて 4 組の実

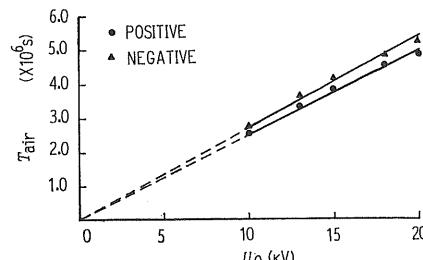


図 4 空気への電荷漏洩時定数  $T_{\text{air}}$  と初期電圧  $U_0$  の関係

Fig. 4 Relation between the charge-decaying-time constant through the air and the initial voltage.

験装置を同時に稼働させて上述の実験を繰り返して行った。実験結果を表 2 に示す。その結果、次のことがわかった。

(1) 印加電圧が異なる帶電球の空気による電荷漏洩時定数  $T_{\text{air}}$  の値はそれぞれ  $T_{\text{str}}$  の 2.6~5.7% で、いずれも  $T_{\text{ins}}$  (3) より 1 枠小さい。したがって、空気中の荷電粒子による電荷の中和が孤立帶電導体球の電荷漏洩の主な原因だということが再度確認する。

(2) 帯電球の表面電界は  $10^5$  V/m 程度、すなわち空気の絶縁破壊強度の  $1/10 \sim 1/5$  であるとき、空気を経由する漏れ電流  $I_{\text{air}}$  は内球に印加される高電圧  $U_0$  を変えても変化せず、ほぼ一定の値をもつようになる。高電圧  $U_0$  の印加と同時に、同心球空気コンデンサ中に存在していた荷電粒子のすべてが、拡散や再結合することなく、直ちに球壁に吸引されて中和される。以後、電気伝導は毎秒単位空間ごとに新たに電離されるイオン対（正イオンと電子の 1 組）および負の電極面から放出される 2 次電子によって行われることになり、印加電圧に関係なく、毎秒中和された荷電粒子数  $N'$  がほぼ一定となるので、空気を経由する漏れ電流値が一定となる。漏れ電流密度は  $10^{-17}$  A/cm<sup>2</sup> 程度に過ぎない。

(3) 内球に印加される高電圧を増すことにしたがって、内球の帶電量も増すが、毎秒中和された荷電粒子数  $N'$  がほぼ一定となるので、空気への電荷漏洩時定数  $T_{\text{air}}$  も増加する。 $T_{\text{air}}$  と  $U_0$  の関係は図 4 に示されるような線形関係である。

(6) 式を再掲する

$$I_{\text{air}} = Q_0 / T_{\text{air}} = CU_0 / T_{\text{air}}$$

空気への漏れ電流値が一定であるので、空気への漏洩時定数  $T_{\text{air}}$  は内球の初期電位  $U_0$  に比例する。

(4) 帯電した内球から空気への電荷漏洩の大きさは帶電極性に依存する。 $N'_+ > N'_-$ 、正電荷は負電荷より漏洩が速い。

表 2 印加電圧が異なる帶電球の電荷漏れ時定数

Table 2 Charge-decaying-time constants for various charging voltage [s] (radius : 62.5 mm).

$U_{ch}$	Positively charged				Negatively charged			
	$T_{leak}(3)$	$T_{leak}(30)$	$T_{air}$	$T_{str}$	$T_{leak}(3)$	$T_{leak}(30)$	$T_{air}$	$T_{str}$
10 kV	$2.27 \times 10^6$	$1.54 \times 10^6$	$2.40 \times 10^6$	$12.9 \times 10^7$	$2.00 \times 10^6$	$1.25 \times 10^6$	$2.14 \times 10^6$	$9.00 \times 10^7$
	1.35	0.712	1.50	4.09	1.69	0.590	2.13	2.45
	2.29	1.19	2.55	6.75	2.13	0.629	2.90	2.41
	2.47	1.15	2.83	5.74	2.72	1.09	3.26	4.91
	3.16	2.18	3.33	19.3	2.92	1.53	3.25	8.71
	Average :	$2.52 \times 10^6$	$9.76 \times 10^7$		Average :	$2.74 \times 10^6$	$5.50 \times 10^7$	
13 kV	$N'_{+} :$		$2.93 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$		$N'_{-} :$		$2.69 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	
	2.43	$0.684 \times 10^6$	$3.39 \times 10^6$	$2.57 \times 10^7$	2.95	$1.56 \times 10^6$	$3.27 \times 10^6$	$8.94 \times 10^7$
	2.59	1.66	2.76	12.5	3.04	1.01	3.91	4.09
	3.39	2.01	3.67	13.3	3.44	2.07	3.71	14.0
	3.71	2.09	4.06	12.9	3.75	2.28	4.04	15.7
	2.19	7.77	2.74	3.25	2.62	1.00	3.20	4.37
18 kV	$N'_{+} :$		$3.32 \times 10^6$	$8.90 \times 10^7$	$N'_{-} :$		$3.62 \times 10^6$	$9.42 \times 10^7$
	$N'_{+} :$		$2.88 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$		$N'_{-} :$		$2.64 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	
	2.96	$1.21 \times 10^6$	$3.53 \times 10^6$	$5.53 \times 10^7$	3.26	$1.77 \times 10^6$	$3.60 \times 10^6$	$10.5 \times 10^7$
	2.81	1.30	3.22	6.54	3.25	1.72	3.61	10.0
	3.76	1.46	4.55	6.45	3.85	1.37	4.82	5.74
	5.10	2.81	5.61	16.9	4.17	2.80	4.41	23.1
20 kV	4.98	2.68	5.50	15.6	4.10	1.23	5.54	4.75
	$N'_{+} :$		$4.48 \times 10^6$	$1.02 \times 10^8$	$N'_{-} :$		$4.81 \times 10^6$	$8.42 \times 10^7$
	$N'_{+} :$		$2.94 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$		$N'_{-} :$		$2.74 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	
	4.47	$2.78 \times 10^6$	$4.80 \times 10^6$	$2.00 \times 10^8$	4.65	$2.57 \times 10^6$	$5.11 \times 10^6$	$1.55 \times 10^8$
	5.18	2.72	5.76	1.54	4.68	2.56	5.15	1.53
	5.26	2.96	5.76	1.82	5.28	2.00	6.46	0.900
	3.32	1.57	3.79	0.801	4.52	1.83	5.40	0.828
	3.03	1.31	3.91	0.624	3.10	1.10	3.88	0.458
	$N'_{+} :$		$4.80 \times 10^6$	$1.36 \times 10^8$	$N'_{-} :$		$5.20 \times 10^6$	$1.05 \times 10^8$
	$N'_{+} :$		$3.05 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$		$N'_{-} :$		$2.81 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$	

#### 4.3 電荷漏洩の極性依存性

同心球空気コンデンサでは、空気中の荷電粒子は二つの部分に分けられる。

一部分は大気中では宇宙線や地中に含まれている放射性物質からの放射線により絶えず電離して発生するイオン対（正イオンと電子の1組）である。大気中の電子・イオン対の生成速度は $1\sim 2 \times 10^7 \text{ 对}/\text{m}^3 \text{ s}$ ほどである<sup>5)</sup>。このうち自然放射能によるものが約8割、宇宙線によるものが2割である<sup>6)</sup>。本論文では、この電離現象を空間効果と名付けた。

他の部分は負の電極面から放出される2次電子であ

る。地表での環境放射線の成分は主として光子（ $\gamma$ 線）、 $\mu$ 粒子、中性子に分類できる。これらのうち、光子は大地放射線源から、 $\mu$ 粒子と中性子は宇宙線からの寄与がそれほど大きい<sup>7)</sup>。いずれも一般に透過力が非常に強い。同心球空気コンデンサでは、光子（ $\gamma$ 線）は光電効果により負の電極面の原子から2次電子をたたき出す。 $\mu$ 粒子は負の電極面に入射すると、主に電磁相互作用を通して電離と電子対生成という小さなエネルギー損失の現象を数多く起こす<sup>8)</sup>。本論文では、上述の現象による負の電極面からの2次電子放出を面積効果と名付けた。面積効果により放出された2次電子は、同心球コンデンサ内

部の強い電界のために、内球の電荷中和に直ちに寄与する。

空間効果と面積効果を合わせて考えると、同心球空気コンデンサ中の内球の電荷中和に寄与する荷電粒子を特定できる。すなわち、毎秒中和に寄与した荷電粒子数  $N'$  は下式で表示できる。

$$\text{内球正帯電: } N'_+ = \delta V + \beta S_b$$

$$\text{内球負帯電: } N'_- = \delta V + \beta S_a \quad (18)$$

ここに、 $\delta$  はイオン対の生成率、 $V$  は同心球空気コンデンサの空気容積、 $\beta$  は負の電極面からの 2 次電子放出率、 $S_b$  は外球の内表面の面積、 $S_a$  は内球の表面積。

本研究においては、同じ環境で、同じ時間帯に、4 組の同じ実験装置を同時に稼働させて実験を繰り返して行ったので、 $\delta$  の経時変化（昼夜差のおそれあり）が実験誤差として見過ごされる危険を防いだ。したがって、(18)式から、

$$\therefore S_b > S_a, \quad \therefore N'_+ > N'_-$$

の結論を得る。すなわち、内球正帯電時の負の電極面（外球の内表面）の面積は内球負帯電時より大きくて、負の電極面から放出された 2 次電子も多いので、毎秒中和に寄与した荷電粒子数  $N'$  も多い。すなわち、正電荷は負電荷より漏洩が速い。同心球空気コンデンサの電荷漏洩の極性依存性は負の電極面の面積の差から解釈できる。

内球に正または負 15 kV の電圧を印加する時、4.2 節で求めた値を上式に代入して次の結果を得る。

$$\delta = 20.8 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}, \quad \beta = 9.57 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

ここで、実験で(18)式の正しさを検証する。

まず、内球に印加される高電圧値をそれぞれ正または負 10 kV, 13 kV, 18 kV と 20 kV に変えて、4 組の実験装置を同時に稼働させて上述の実験を繰り返して行った。こうして計算された  $\delta$  と  $\beta$  の値を表 3 に示す。 $\delta$  と  $\beta$  は内球に印加される高電圧が異なってもそれっぽく等しい値を示している。

さらに、内球の直径を変えた 4 組の実験装置を用いて同時に上述の実験を繰り返した。内球の直径を変えてても、内球の表面電界  $E_a$  と外球の表面電界  $E_b$  との幾何平均値が一定値を保つように、内球に印加される高電圧の値を定めた。すなわち、それぞれの電界は下式を満足する。

$$(E_a E_b)^{1/2} = (E_a' E_b')^{1/2} \quad (19)$$

変形して次式を得る。

$$U_0 / (b - a) = U_0' / (b - a') \quad (20)$$

ここに、 $b$  は外球の内側半径。

半径  $a'$  である内球の初期電位  $U_0'$  は次式によって定める。

表 3 帯電球（半径 62.5 mm）の印加電圧と  $\delta$  および  $\beta$  の測定値

Table 3 Measured values of  $\delta$  and  $\beta$  at various voltage applied to inner sphere (radius: 62.5 mm).

$U_{\text{ch}} [\text{kV}]$	$\delta [\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$	$\beta [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$
10	$2.06 \times 10^7$	$1.04 \times 10^5$
13	$2.02 \times 10^7$	$1.04 \times 10^5$
15*	$2.08 \times 10^7$	$0.957 \times 10^5$
18	$2.11 \times 10^7$	$0.870 \times 10^5$
20	$2.16 \times 10^7$	$1.04 \times 10^5$

\* 本文中の値再掲

$$U_0' = U_0 (b - a') / (b - a) \quad (21)$$

上式により計算すると、半径 75.0 mm と 100.0 mm である内球に印加する高電圧はそれぞれ 12.5 kV と 8.5 kV である。

上述の半径である二つの内球を使って、漏れ時定数  $T_{\text{leak}}(3)$  と  $T_{\text{leak}}(30)$  をそれぞれ測定して、(11) および (12) 式により、 $T_{\text{air}}$  と  $T_{\text{str}}$  を分離推算した。半径 75.0 mm および 100.0 mm である帶電球の電荷漏洩時定数の実測値と分離推算値をそれぞれ表 4 と表 5 に示す。こうして計算した毎秒中和に寄与した荷電粒子数  $N'$  も表 4, 5 にまとめた。実験結果より計算した  $\delta$  と  $\beta$  の値を表 6 に示す。表 6 の  $\delta$  と  $\beta$  は内球の半径が異なってもそれっぽく等しい値を示している。

以上から、(18) 式は成立することがわかる。電荷漏洩の極性依存性は負の電極面の面積の差から解釈できる。

## 5. ま と め

帶電球の近傍の電界が  $10^5 \text{ V/m}$  程度、すなわち、空気の絶縁破壊強度の  $1/10 \sim 1/5$  の大きさであるときの同心球空気コンデンサの電荷漏洩について研究した結果、次のことを明らかにした。

孤立帶電導体球の電荷漏洩は絶縁支持物を経由する成分と空気中の荷電粒子により中和される成分からなる。前者の漏れ時定数は後者より 1 枠大きいことがわかった。それゆえ、空気中の荷電粒子による中和が電荷漏洩の主な原因と認められる。つまり、異符号の荷電粒子が帶電球に吸引されることによって電荷中和が生じる。その結果、内球に印加される高電圧値を変えて、空気を経由する漏れ電流は変化せず、ほぼ一定の値をもち、漏れ電流密度は  $10^{-17} \text{ A/cm}^2$  程度に過ぎない。内球に印加される高電圧値を増すにしたがって、空気への電荷漏洩時定数も増大する。帶電内球より空気への電荷漏洩には極性依存性がある。電荷漏洩の極性依存性は負の電極面の面積の差から解釈できる。

表 4 帯電球 (半径 75.0 mm) の電荷漏れ時定数  
Table 4 Charge-decaying-time constants [s] (radius : 75.0 mm, applied voltage : 12.5 kV).

Positively charged				Negatively charged			
$T_{\text{leak}}(3)$	$T_{\text{leak}}(30)$	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$	$T_{\text{leak}}(3)$	$T_{\text{leak}}(30)$	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$
$4.02 \times 10^6$	$1.27 \times 10^6$	$5.29 \times 10^6$	$5.01 \times 10^7$	$4.38 \times 10^6$	$2.27 \times 10^6$	$4.88 \times 10^6$	$12.7 \times 10^7$
3.35	2.51	3.48	27.0	3.11	2.13	3.28	18.4
3.73	1.90	4.18	10.5	4.10	1.32	5.05	5.26
3.90	1.52	4.72	6.75	4.29	1.96	4.95	9.75
3.62	1.71	4.13	8.74	3.91	1.19	5.24	4.62
3.90	1.67	4.58	7.87	4.27	2.21	4.76	12.6
4.34	1.49	4.90	6.14	4.44	1.38	5.89	5.40
Average :		$4.47 \times 10^6$	$1.03 \times 10^8$	Average :		$4.86 \times 10^6$	$9.82 \times 10^7$
$N'_{+}$ :		$2.89 \times 10^5$	$\text{s}^{-1}$	$N'_{-}$ :		$2.66 \times 10^5$	$\text{s}^{-1}$

表 5 帯電球 (半径 100.0 mm) の電荷漏れ時定数

Table 5 Charge-decaying-time constants [s] (radius : 100.0 mm, applied voltage : 8.5 kV).

Positively charged				Negatively charged			
$T_{\text{leak}}(3)$	$T_{\text{leak}}(30)$	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$	$T_{\text{leak}}(3)$	$T_{\text{leak}}(30)$	$T_{\text{air}}$	$T_{\text{str}}$
$6.18 \times 10^6$	$3.45 \times 10^6$	$6.78 \times 10^6$	$2.11 \times 10^8$	$7.38 \times 10^6$	$3.48 \times 10^6$	$8.44 \times 10^6$	$1.78 \times 10^8$
8.24	3.66	9.57	1.78	8.89	4.17	10.2	2.12
9.95	3.73	12.2	1.61	7.65	3.28	8.98	1.84
7.88	3.85	8.92	2.03	8.05	3.78	9.22	1.93
6.16	3.10	6.92	1.68	7.07	3.03	8.31	1.43
4.57	2.29	5.14	1.24	5.30	2.52	6.04	1.30
5.12	2.45	5.83	1.27	6.75	2.78	8.04	1.27
Average :		$7.91 \times 10^6$	$1.67 \times 10^8$	Average :		$8.46 \times 10^6$	$1.67 \times 10^8$
$N'_{+}$ :		$2.24 \times 10^5$	$\text{s}^{-1}$	$N'_{-}$ :		$2.10 \times 10^5$	$\text{s}^{-1}$

表 6 帯電球の半径と  $\delta$  よび  $\beta$  の測定値Table 6 Estimation of  $\delta$  and  $\beta$  for three different inner spheres.

$a[\text{mm}]$	$U_{\text{eh}}[\text{kV}]$	$\delta[\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}]$	$\beta[\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$
62.5*	15.0	$2.08 \times 10^7$	$0.957 \times 10^5$
75.0	12.5	$2.15 \times 10^7$	$1.11 \times 10^5$
100.0	8.5	$2.07 \times 10^7$	$0.914 \times 10^5$

\* 本文中の値再掲

以上の研究より、空気の絶縁破壊強度の  $1/10 \sim 1/5$  の程度の大きさの電界でも、高電圧印加される孤立導体について、空気を介した漏れ電流が無視できないことが判明した。

## 参考文献

- 1) 村崎憲雄、松井満、藤林宏一：電気学会論文誌D, 107

- (1987) 1243  
 2) 村田泰司、多田泰芳：静電気学会講演論文集, 1978, p. 110  
 3) 藤林宏一：静電気学会誌, 18 (1994) 250  
 4) J.J. Thomson and G.P. Thomson : *Conduction of Electricity through Gases*, p. 17, Cambridge Univ. Press (1928)  
 5) 家田正之：現代高電圧工学, p. 23, オーム社 (1981)  
 6) V.F. Hess and G.A. O'Donnell : J. Geophys. Res., 66 (1951) 557  
 7) 西村純：宇宙放射線, p. 473, 共立出版 (1986)  
 8) A. Okada, S. Higashi, K. Honda, K. Kobayakawa, Y. Minorikawa, M. Shibata, H. Shibata, Y. Kamiya and Y. Teramoto : Forsch. der Physik, 4 (1984) 135

## 記号表

 $a[\text{m}]$  : 内球の半径 $b[\text{m}]$  : 外球の内側半径 $C[\text{F}]$  : 同心球空気コンデンサの静電容量

$E$ [V/m] : 電界強度	$S_a$ [m <sup>2</sup> ] : 内球の表面積
$E_a$ [V/m] : 内球の表面電界	$S_b$ [m <sup>2</sup> ] : 外球の内表面の面積
$E_b$ [V/m] : 外球の表面電界	$T_{air}$ [s] : 空気による電荷漏れ時定数
$e$ [C] : 電気素量	$T_{ins}$ [s] : 吊り糸による電荷漏れ時定数
$I_{air}$ [A] : 空気を経由する漏れ電流	$T_{leak}$ [s] : 同心球空気コンデンサの電荷漏れ時定数
$I_{ins}$ [A] : 内球の吊り糸を経由する漏洩電流	$T_{str}$ [s] : 吊り糸 1 本による電荷漏れ時定数
$I_{leak}$ [A] : 同心球空気コンデンサの漏れ電流	$t$ [s] : 観測時間
$i_a$ [A/m <sup>2</sup> ] : 内球近傍の電流密度	$U$ [V] : 内球の電位
$l$ : 吊り糸本数	$U_{ch}$ [V] : 充電直後の内球電位, すなわち印加電圧
$m$ : 吊り糸本数	$U_0$ [V] : 内球の初期電位
$N$ [個] : 内球に中和される荷電粒子数	$V$ [m <sup>3</sup> ] : 同心球空気コンデンサの空気容積
$N'$ [個/s] : 内球に毎秒中和される荷電粒子数	$\beta$ [個/m <sup>2</sup> s] : 負の電極面からの 2 次電子放出率
$Q$ [C] : 内球の帶電量	$\delta$ [個/m <sup>3</sup> s] : イオン対の生成率
$Q_0$ [C] : 内球の初期帶電量	