

箔検電器の特性と放射線の測定

Characteristics of leaf electroscope and measurement of radiations

森 千鶴夫[†]、 緒方 良至^{††}
Chizuo Mori, Yoshimune Ogata

Abstract : Charge and discharge characteristics of leaf electroscope were examined. When the leaf was charged with negative electric charge and exposed to frame, the closing time of the leaf was smaller than the case that the leaf was charged with positive electric charge, because the frame contains large proportion of positive ions. The dose rate of X-rays emitted from Krookes tubes used in Junior and Senior high schools for electron beam experiments can be measured with leaf electroscopes being kept in most of such schools. Therefore, the teachers can measure the dose rate by themselves without having rather expensive radiation measurement instruments.

1. はじめに

箔検電器は中学校や高等学校においては理科教材としてほぼすべての学校に備えられている。主として摩擦静電気の実験に使用されている。電気という目に見えない物理量を簡単な道具で可視化するので、極めて魅力的な教材として重用されている。しかし、その基本的な特性は十分には検討されていないように思われ、かつ、利用方法も検討の価値が十分にあると考えられる^{1, 2)}。

このような観点から、本論文では、箔検電器の荷電、放電に関する特性、正電荷の荷電と負電荷の荷電の相違、応用としての放射線の測定、などについて述べる。

2. 箔検電器の荷電特性と放電特性

使用した箔検電器は、びんの直径約 90mm、高さ 175mm、電極板直径 50mm (学林舎) である。箔検電器の下部に直流の高電圧電源の負電極からの導線を置き、上部の電極板に正電極からの導線を接続して電圧を印加し、印加電圧と箔の開き角の関係を求めた結果を図 1 (a) に示す。印加電圧が 0 の時に、箔の開き角が 5 度であったが、これは箔の残留たわみによるものである。印加電圧の上昇と共に、箔の開き角は大きくなり、開き角が約 20 度から約 60 度まではほぼ直線である。65 度以上になると箔の開き角は飽和し、徐々に 90 度に近付いて行く。しかし、荷電

される電荷は印加電圧に比例して増加する。この箔検電器の静電容量 C は、三和電子の Digital Multimeter

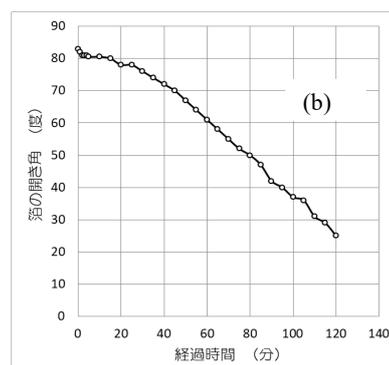
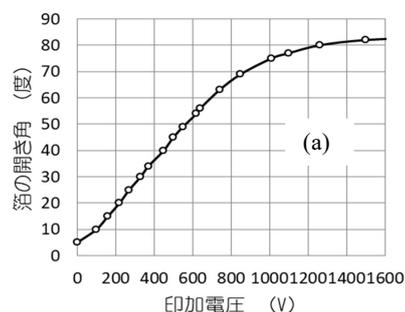


図 1 (a) 箔検電器の電極への印加電圧と箔の開き角の関係、(b)箔の開き角が時間の経過と共に自然に減少して行く状況

PM3 で測定した。しかし、この meter の最小目盛りは 1 pF であり、箔検電器を接続した場合としない場合の指示目盛りの相違は 1 pF の場合と 2 pF の場合がほぼ等しい頻度で現れるので、平均値の 1.5 pF を採用した。誤差

[†] 愛知工業大学 工学部 応用化学科 (客員教授)

^{††} 名古屋大学 アイソトープ総合センター

は±30%程度はあると思われる。

印加電圧がVの場合に電極に荷電された電荷Qおよび電子の数 N_e は、電荷素量をeとすれば次式で求められる。

$$N_e = Q/e = CV/e \quad (1)$$

Vが600Vの場合に荷電電荷量Qは 9×10^{-10} クーロンであり、電子の数 N_e は 5.6×10^9 electronsになる。

図1(b)に空調された理科実験室で測定した自然の放電特性を示す。この自然の放電特性は、電極の絶縁体部分を漏洩する電流と、電極に流れ込む空気中のイオンの量によって大いに異なる。従って、先ず露出した絶縁体部分を綿棒などで拭ってホコリ等の付着を除去するのがよい。また、空調の排気口の近くやガスストーブの近くでは開き角の減少は速い。この自然放電特性は測定環境によって大いに異なり、図1(b)は一例である。しかし、総じて、(a)の充電特性とはほぼ鏡像の関係にあり、開き角が60度以上では、余分に充電されている電荷の消費に時間がかかる。60度以下では開き角はほぼ直線的に減少する。

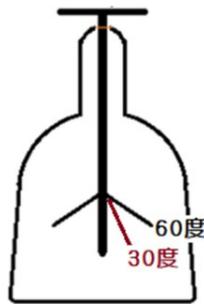


図2 半減時間Tを求めるための角度

以下では開き角の減少の目安として、図2に示すように60度から30度までに減少する時間を「半減時間T」とする。図1(b)では60度における62分から30度における112分までの時間で $T=50$ 分=3000秒である。

3. 正負荷電の相違

箔検電器の電極への荷電の電荷の正負による放電特性の相違は、図1の自然放電を含めて今までで見出されていないと思われる。一般的に、図3に示すように、ローソク等の炎を電極に近付けると箔は急速に閉じる。これは、炎はプラズマで多くのイオンを含んでいるからである。しかし、炎は一般に正の電荷のイオンで構成されていることが知られている³⁾。従って、箔検電器の電極に正の電荷を荷電した場合と、負の電荷を荷電した場合とでは箔が閉じる時間が異なる。測定を繰り返し行った結果を図4に示す。正の電荷を荷電した場合には、電極は炎を構成している正のイオンを引き寄せる



図3 ローソクの炎を箔検電器の電極の端から約10cm離して置く

ことができずに少量存在する負のイオンを、時間をかけて引き寄せるため半減時間Tは大きい。このような現象は今までには報告されていない。

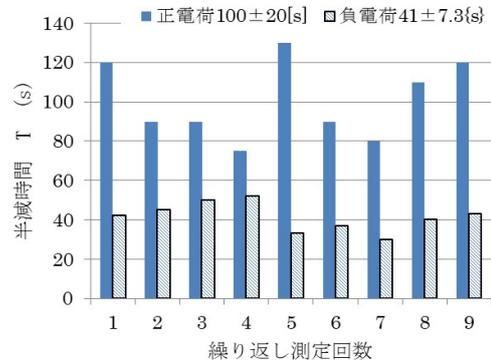


図4 図3の電極に正の電荷を荷電した場合と負の電荷を荷電した場合の半減時間Tの相違

4. 放射線測定

4-1 マントル線源

カンテラの灯芯として使われるマントルには炎の安定化のためにトリウムが微小含まれている（現在市販されているマントルには含まれていない）。このトリウムからはアルファ線、ベータ線、ガンマ線が放出されている。従って、マントルを図5に示すように、箔検電器の電極の上に乗せれば、その上部の空気はマントルからの放射線によって電



図5 灯芯として使われるマントルに含まれるトリウムからの放射線による箔の開き角の減少

離され、正負のイオンができる。従って、電極の電圧によってイオンが引き寄せられ、箔検電器に荷電されていた電荷を中和する。結果として、図6に示すように箔は徐々に閉じて行く。

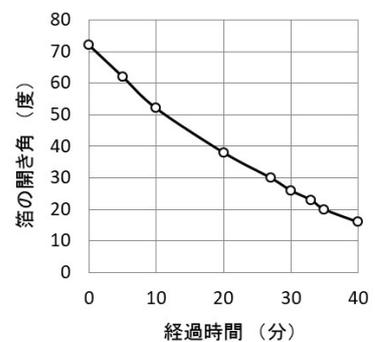


図6 図5における箔の開き角と経過時間の関係

60度から30度までの半減時間 T は21分である。この時間内に式(1)で示す 5.6×10^9 個の電子の $1/2$ が中和される。即ち、放射線は箔検電器の近傍で 2.8×10^9 個のイオン対をつくり、1秒間では 2.2×10^6 個のイオン対を作る。空気の W 値は 34eV なので、
 $2.2 \times 10^6 \times 34 \times (1.6 \times 10^{-19}) = 1.2 \times 10^{-11} \text{ J/s}$ のエネルギーが箔検電器の近傍に、放射線によって作られていることになる。

4.2 クルックス管からの漏洩 X 線の線量率の測定

近年、中学校や高等学校において、電子線の学習に使用する放電管の一種であるクルックス管からの漏洩 X 線が放射線防護上注目されている。中学校や高等学校には放射線測定器はほとんど備えられていない。しかし、4.1で述べたように、箔検電器によって空気中の電離電荷の測定が可能である。箔検電器で漏洩 X 線の線量率の測定が可能であれば、学校の教諭の方々が自身で測定することが可能になる。

このような観点から、図7に示すように、クルックス管からの漏洩 X 線の線量率を電離箱で測定し、同じ位置に箔検電器を置いて、前記の半減時間 T を測定した。なお電離箱は $70 \mu\text{m}$ 線量当量率を測定する。

図8(a)は、クルックス管の X 線発生の中心から様々な距離 (cm) における電離箱の線量率 ($\mu\text{Sv/h}$) を示す。一般に、X 線のような電磁波放射線の場合には、線量率は理論的には距離の2乗に反比例する。その様子を図中の細い実線で示す。両対数目盛のグラフにおいて、 -2 の勾配を持っている。電離箱によって測定した線量率を図中の点線で示すが、ほぼ -2 の勾配の細い実線に一致している。距離が数100cmになると、約 20keV のエネルギーの X 線は空気によって若干吸収されるので、細い実線よりも少ない値になる。

電離箱で測定した位置と同じ位置に箔検電器を置いて、箔が閉じる半減時間 T を測定した結果を太い実線で示す。線量率と半減時間 T とは反比例の関係にあるので、半減時間 T と距離の関係は基本的には $+2$ の勾配を持つ。距離が大きい時、すなわち線量率が小さい時には、ほぼ $+2$ の勾配を持っているが、距離が小さい時、すなわち線量率が大きい時には、 $+2$ の勾配より小さくなっている。

この関係をより明確にするために、図8(a)から、電離箱によって測定した線量率と箔検電器によって測定した半減時間 T との関係を求め(b)に示す。この関係は理論的には -1 の勾配を持っていないといけない。何故なら半減時間 T は線量率に反比例するはずだからである。線量率が約 $50 \mu\text{Sv/h}$ 以下では、 -1 の勾配が保たれていて、 $22 \mu\text{Sv/h}$ の時に、 T が 100 s である関係を用い、かつ、

図1(b)の自然放電を考慮にいれると次の式が得られる。

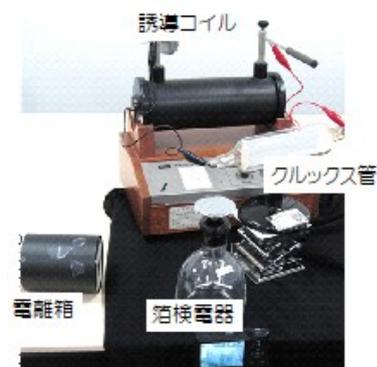


図7 クルックス管を誘導コイルで動作させ、発生した X 線を電離箱で、クルックス管からの距離の関数として測定し、おなじ場所に箔検電器を置いて半減時間 T を測定した。

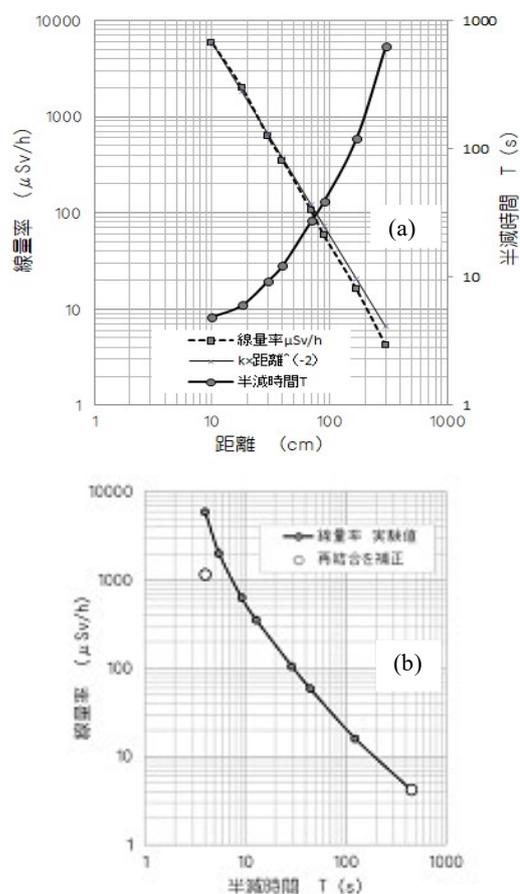


図8 (a)クルックス管からの距離の関数としての電離箱で測定した X 線線量率と箔検電器で測定した半減時間 T , (b) 線量率と半減時間 T の関係 ((a)から求めた)

$$S[\mu\text{Sv/h}] = \frac{(\theta_0 - \theta) \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}{k} = 2.2 \times 10^3 \left(\frac{1}{T(\text{s})} - 3.3 \times 10^{-4} \right) \quad (2)$$

自然放電による T は約 3000 s なので、 T が 600 s 程度までは X 線の線量率をかなり正確に測定できると考えられる。従って最小感度は $3 \mu\text{Sv/h}$ となる。即ち、 $3 \mu\text{Sv/h}$ ($T=600\text{s}$) から $50 \mu\text{Sv/h}$ ($T=50\text{s}$) の範囲で式(2)は利用できる。 $50 \mu\text{Sv/h}$ ($T=50\text{s}$) から 1mSv/h ($T=7\text{s}$) までは図 8 (b) の校正曲線を使用すればよい。 1mSv/h 以上 ($T=7\text{s}$ 以下) では箔検電器では測定が困難であると思われる。

1mSv/h 以上の線量率においては、半減時間 T が線量率に反比例しない理由としては、空気の単位体積当たりのイオンの密度が高くなること、および箔検電器の電極の電圧があまり高くないこと、などの理由により正負のイオンの再結合が生じているためと考えられる。

今、線量率が図 8 (b)において最も高い値である $5900 \mu\text{Sv/h}$ の時に空気 1cm^3 当り、1 秒間当りに作られる正負のそれぞれのイオンの濃度 n^+ 、 n^- は $4.0 \times 10^5 \text{ions/cm}^3\text{s}$ である。したがってイオンの再結合係数 α ($\approx 2 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{s}$) を用いて単位時間当たりのイオンの再結合による減少は

$-\text{dn}/\text{dt} = \alpha n^+ n^- = 3.2 \times 10^5 \text{ions/cm}^3\text{s}$ となり、最初の濃度 $4.0 \times 10^5 \text{ions/cm}^3\text{s}$ に対する比は 0.8 になる。イオン濃度は約 2 割に減少する。この値を図 8 (b) に白丸で示す。このことから、高い線量率においては正負のイオンの再結合によって箔検電器では測定が困難になることが分る。

箔検電器の半減時間 T を測定して、式(2)を用いて、あるいは、図 8 (b) の校正曲線を用いて、 X 線の線量率を測定することができることを提案したが、では、この式や校正曲線は、どのような箔検電器においても汎用することができるのであろうか。筆者は、静電容量が 2 倍程度異なる箔検電器、即ち箔の同じ開き角に対して、荷電のための印加電圧が 2 倍ほど高い箔検電器で同じ X 線線量率に対する半減時間を検討したところほとんど同じであった。これは、静電容量が大きいために荷電量が大きくなるが、電極の電圧も高いために、電極周辺のイオンを集める実質的な体積が大きいためと思われる。いろんな

箔検電器について今後検討する必要がある。

5. まとめ

箔検電器はほとんどの中学校や高等学校に保有されていて、主として静電気の実験に使用されている。本論文では、箔への電荷の荷電特性と放電特性を調べ、両者はほぼ鏡像の関係にあることを示した。また、箔に正の電荷を荷電した場合と負の電荷を荷電した場合には、ほとんどの現象において相違はないが、炎を近付けたときの放電の様子が異なることを見出した。これは、炎はほとんど正のイオンから成り立っているためである。

中学校や高等学校では、電流や電子の実験にクルックス管が使用される。現在これらの学校で使用されているクルックス管は X 線を放出するのが多いが、 X 線の線量率を測定するための放射線測定器を保有していない学校がほとんどである。本論文では、おおむねどの学校においても保有されている箔検電器で X 線線量率を測定することを試みた。電離箱で得られる線量率で箔検電器の箔が閉じる速さを校正すれば、線量率のある範囲内において、閉じる速さから未知の線量率が得られることを示した。しかし、個々の箔検電器に対して電離箱による校正をする必要があるかどうかは今後検討しなければならない。

謝辞

実験に関して愛知県立名古屋南高等学校の臼井俊哉教諭から多大の支援を得た。深く謝意を表す。

文献

- 1) 森 千鶴夫: 手作り箔検電器と放射線の測定、Isotope News, No. 2, 17-22, 2007
- 2) 森 千鶴夫: 手作り箔検電器と高電圧、高抵抗の測定、愛知工業大学研究報告、第 46 号、255-258, 2011
- 3) 森 千鶴夫: ローソクの炎と電界・電流、愛知工業大学研究報告、第 47 号、369-371, 2012

(受理 平成 30 年 3 月 10 日)