

【論文】

磁気浮上電極電離箱を用いた超高抵抗測定方法

一木 博文*¹, 川口 俊郎*¹, 佐藤 伸一*¹, 前 寛信*¹

Measuring super-high resistivity with magnetically levitated ionization chamber

Hirofumi Ichiki, Toshiro Kawaguchi, Shinichi Satou, Hironobu Mae

Abstract: Super-high resistivity measuring equipment using magnetically levitated ionization chamber was developed. By using this equipment, we can take influence of noise by a background and measure the resistance accurately.

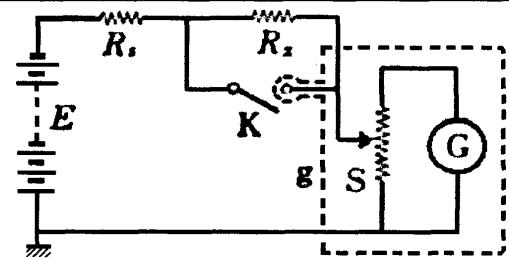
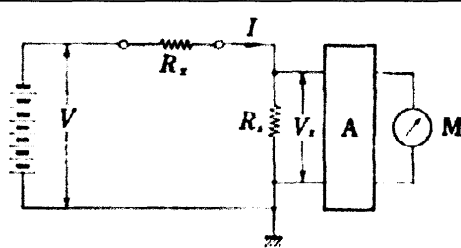
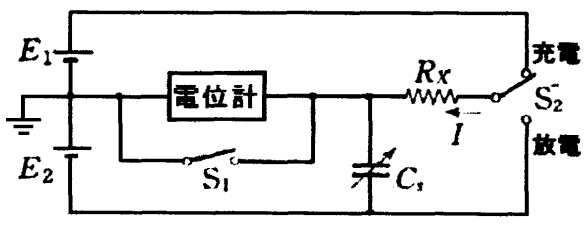
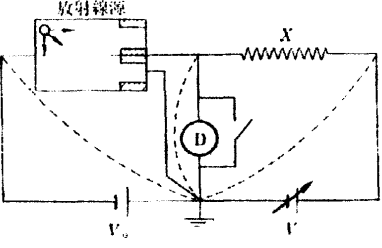
This time, taking the measure which prevents a surface-end electric current of a sample, we could measure the true current value. So, more than $10^{18} \Omega$ of resistance value could be calculated from the value.

Keywords: Magnetically levitating equipment, resistivity, environmental gamma rays,

1. 序論

エレクトロニクスの進歩に伴い、高精度の電子機器が必要とされる。例えば高感度エレクトロメータ等は、きわめて微小な電流や電圧測定が行えるような高精度の信頼性が要求される。この精度を実現させるために、測定系を構成する高抵抗あるいは超高抵抗物質の検定を行うことが必要である。

表1に示すように、 $10^{12} \sim 10^{14} \Omega$ 程度の高抵抗の測定方法に関しては、検流計法、直流増幅方法等が知られている。しかし、これらの測定方法では $10^{15} \Omega$ 以上の測定は不可能であると考えられる。また、半減期の長いアイソトープを封入した電離箱を安定な標準定電流源として用いる電離箱法では、 $10^{17} \Omega$ までの測定が可能とされている。^{1), 2)}

方法	検流計法	直流増幅法
概要	 <p>$R_x(\text{未知抵抗}) = (F_s \theta_s / F_x \theta_x - 1)$ θ_s, θ_x: 検流計のふれ、F_s, F_x: 分流器 S の倍率</p>	 <p>A: 直流増幅器、M: 支持計 $R_x(\text{未知抵抗}) = R_s V / V_x$</p>
方法	超高抵抗測定法	電離箱法
概要	 <p>電位計の指示値 0 で $R_x(\text{未知抵抗}) = r_x \Delta t / r_s \Delta C$</p>	 <p>放射線源を定電流源としたもの</p>

*1: 工学部電気情報工学科

これらの測定方法は主に短時間の通電状態にて測定されるのに対し、電気機器は長時間通電され、抵抗値も使用時間によって特性が変化する。従って、実際の使用に近い状態で測定を行う方がより正確であると考えられる。しかし、測定時間を長くすればそれだけ測定結果にノイズが含まれることになる。このノイズは環境条件や、回路固有の特性からなる電流・電圧ドリフトが原因である。その中の環境的ストレスの影響を除去できる測定技術があれば、実際の使用状態に近い状態での高抵抗素子の評価が可能となる。

我々は、磁気浮上電極電離箱を用いて、環境的ストレスの原因であるバックグラウンド（環境 γ 線）の測定方法を開発するとともに、さらにこの方法を用いて従来の電離箱方と異なる超高抵抗測定方法を開発したので報告する。この装置を用いると、 10^{20} Ω の超高抵抗が測定可能となる。³⁾

2. 磁気浮上電極電離箱を用いたバックグラウンド測定方法

2.1 磁気浮上電極電離箱の開発

磁気浮上電極を適用した電離箱によるバックグラウンド測定方法を図1に示す。

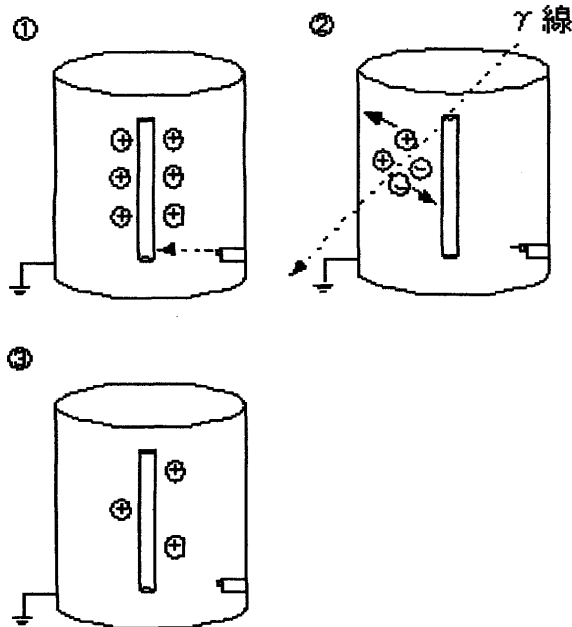


図1 磁気浮上電極電離箱を用いたバックグラウンド測定方法

測定は、以下のように行う。

- (1) 電離箱内部に磁力により電極を浮上させる
- (2) 浮上させた電極に正電荷を与える。(①)
- (3) 電離箱内部に γ 線が侵入すると、電離箱内の気体が電離作用を起こし、電子は電荷収集電極に捕獲される。一方、電離箱内壁には導電性カーボンが塗布されており、正の荷電粒子は電極電荷に反発してこの内壁に衝突する。(②)
- (4) 電子が電極に捕獲されると電極表面の正電荷が相殺され、電荷量が減少する。その電荷の減少分を測定し、環境 γ 線量に換算する。(③)

この測定方法によれば、電極は非接触の状態で浮上し続けるので、支持材を必要としない。従って支持材からのリーク電流の影響を考慮することなく、環境 γ 線による電離作用で発生した電子を捕獲することによってのみ、電極の電荷が減少する。³⁾

2.2 磁気浮上装置の構成

磁気浮上装置を図2に示す、装置は電離箱、電磁石、赤外線LED、受光ダイオード、電子回路、ファラデーゲージ及び昇降装置より構成される。

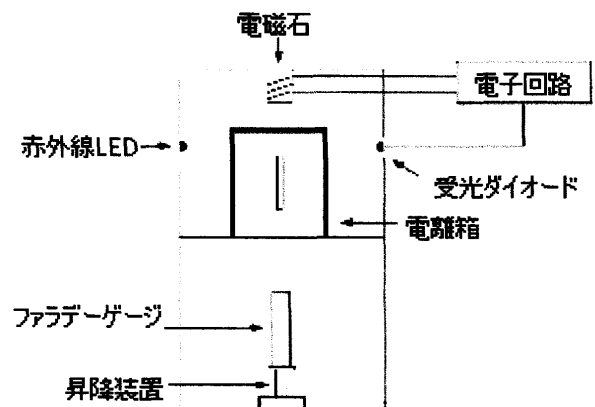


図2 磁気浮上放射線測定装置

電荷収集電極を一定の位置に静止させるには、電磁石、赤外線LEDおよび受光ダイオードを用いる。電極が静止位置より上昇すると、電極の上端が水平ビーム光の一部さえぎり、受光ダイオードの受光量が減少する。また、電極が静止位置より下降すると、LED光の通過量が大きくなり、受光量が増加する。センサの受光量に応じて電磁石の駆動電流を増減させ、電極を一定の位置に保っている。³⁾

2.3 ファラデーケージによる電極電荷の非接触測定

浮上している電極からの電荷の測定には、ファラデーケージを用いて完全に非接触で測定することができる。ファラデーケージとは、2重の円筒構造からなるコンデンサである。測定原理を図3に示す

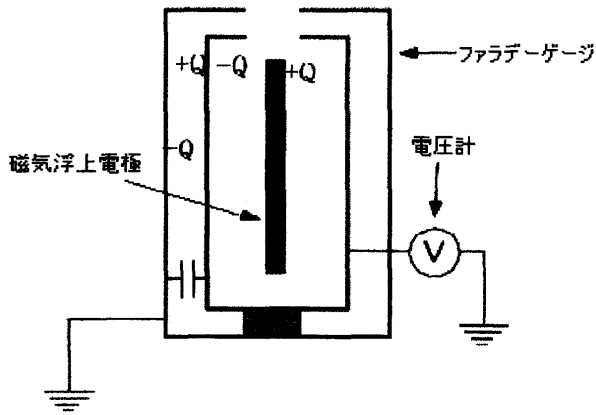


図3 ファラデーケージによる電極電荷の測定

+Q(C)に帯電した磁気浮上電極がファラデーケージに挿入されると、ファラデーケージ内面には-Q(C)の電荷が誘導される。その電荷量Qは、ファラデーケージの容量をC(F)、電圧計に指示される電圧をVとすると、 $Q=C \cdot V$ の関係が成り立つ。

また、エレクトロメータを使えば直接電荷を読み出すことも可能である。この方法によって、従来の放射線測定器では測定できなかった低レベルの放射線測定が可能となった。³⁾

2.4 浮上電極の測定に適したファラデーケージ構造

電極電荷の読み取りの際には、電極位置は変えずに、ファラデーケージを上昇させながら電極を挿入する。電極電荷は静電誘導の原理で非接触で読み出される。なお、ファラデーケージが挿入されている間もLED光が電極の位置を認識しておく必要があるため、図4のように、ファラデーケージ上部にも光が通過できるようなスリットを設けている。³⁾

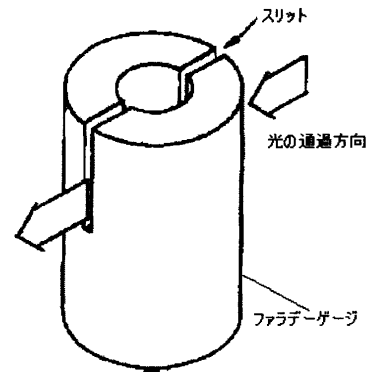


図4 スリットを設けたファラデーケージ

3. 磁気浮上電極電離箱を用いた超高抵抗測定方法

3.1 超高抵抗測定装置の構造

例えば、 10^{18} の超高抵抗の場合、1kVの電圧を加えても流れる電流は 10^{-15} Aである。一方、磁気浮上電極電離箱で測定するバックグラウンドは 10^{-16} A程度であるため、測定値にこのバックグラウンドがノイズとして加わると、測定値の信頼性が低くなる。従って、磁気浮上電極電離箱でバックグラウンドを測定する一方、同じ条件で試料に流れる電流を測定すれば、両者の差をとることでバックグラウンドの影響を除いた正味の電流が測定できる。

電離箱を用いた抵抗測定装置を図5(a)に示す。電極と試料を接続し、さらにその試料と電離箱を接続する。電極を電離箱より吊るす状態になるので、磁気浮上電極と同じ条件で測定ができる。^{3), 4)}

作成した試料を(b)に示す。試料には、加工性のよいパラフィンを用いた。融解したパラフィンを直径15mmのガラス管内で凝固させ、それを5mm, 10mm, 15mmの厚さに切り出した。切り出したパラフィンの上下に同じ径のアルミ板を接着した。接着には導電性のドータイトを用いた。

アルミ板と電極との接続は電極の自由度を保てるため、市販のタコ糸を用いた。タコ糸にはアクアダグ(導電性カーボン)を純水で溶いた液をしみ込ませた。タコ糸の電気抵抗は2~3kΩであったが、 10^{15} 以上の高抵抗試料に接続するには十分な導電性があると考えられる。

抵抗測定の原理を(c)に示す。電極に蓄えられた電荷は、試料中に流れる電流として減少する一方、バックグラウンドにより発生する電子との相殺によっても減少する。電荷減少分の時間変化が電流となるため、電極電位(電圧)との関係から抵抗値が求まる。

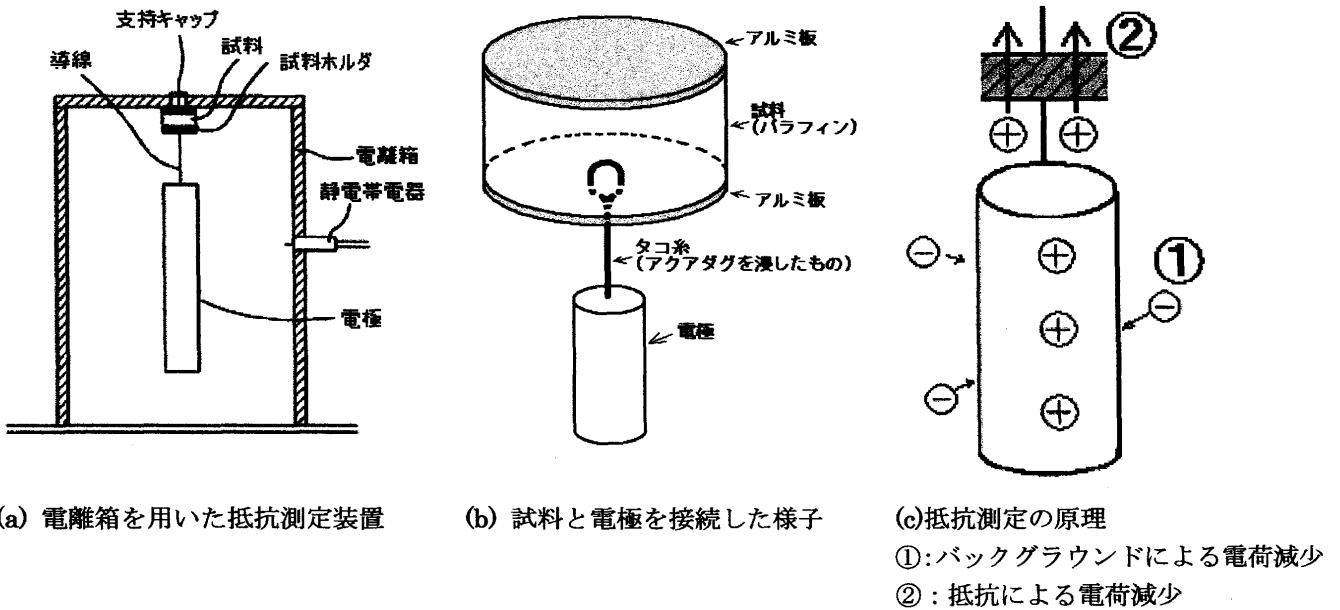


図5 電離箱を用いて抵抗を測定する方法

3.2 磁気浮上電極電離箱との並列運転による超高抵抗測定

上記の方法で、試料に流れる電流と、バックグラウンドによる電離電流をあわせて測定していることになる。バックグラウンドの線量は一日周期で変動し、また天候などによっても変化するため常に監視しておく必要がある。

そこで、図6のように同じサイズの磁気浮上電極電離箱と並行して測定を行い、両者の差をとることで正確な超高抵抗測定が可能になる。なお、二つの電離箱の電離体積は共に1リットルとした。⁴⁾

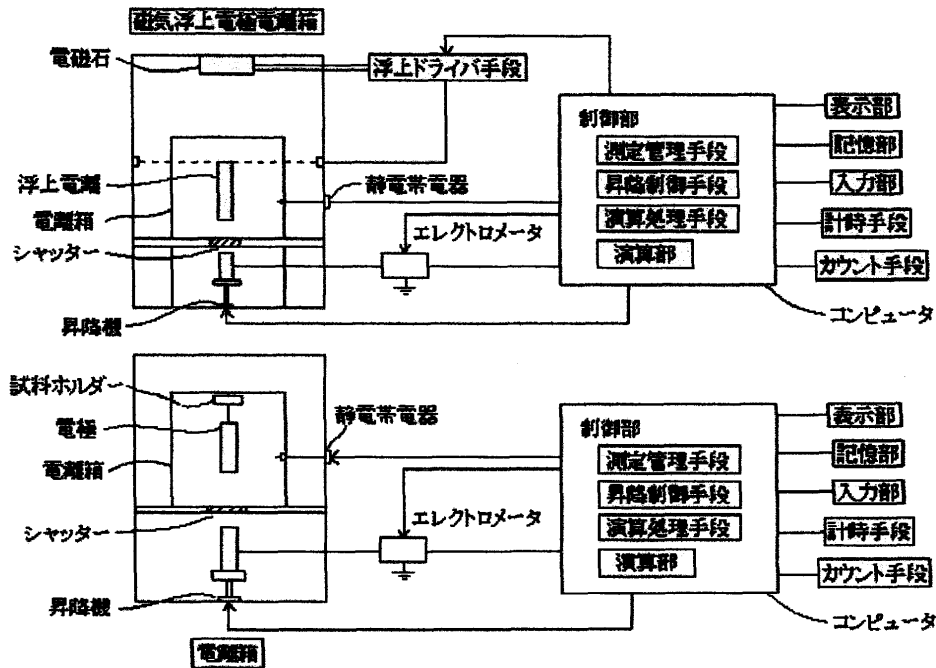


図6 磁気浮上電極電離箱を用いた超高抵抗測定方法

3.3 試料の沿面に流れる電流の防止

作製した試料では、電極の電荷が試料内部を通らずに、沿面を伝わって電離箱側へ流れてしまう恐れがある。そこで、電極側のアルミ板をパラフィンで覆ってみた。

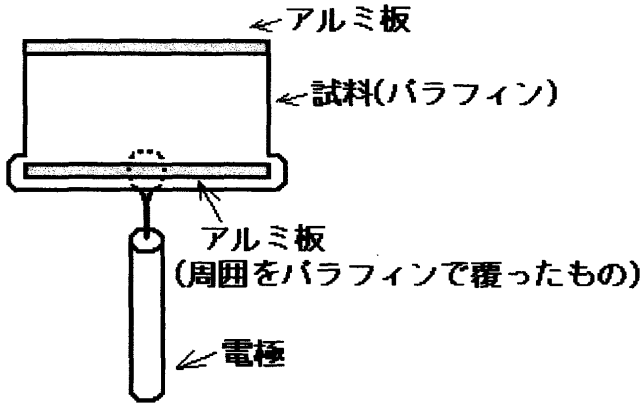


図7 沿面電流抑制対策

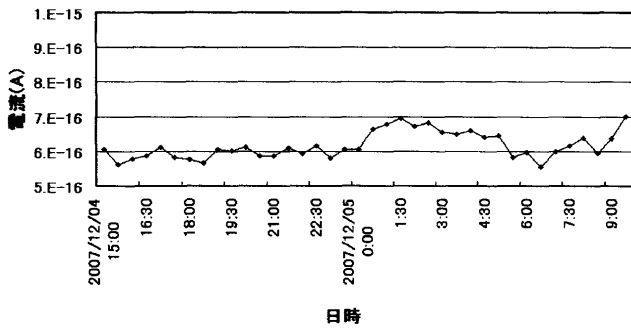
以上により、下記の4種類の試料を作成した。

- A: 厚さ 5mm、パラフィン被覆有り。
- B: 厚さ 10mm、パラフィン被覆有り。
- C: 厚さ 15mm、パラフィン被覆有り。
- D: 厚さ 5mm、パラフィン被覆無し。

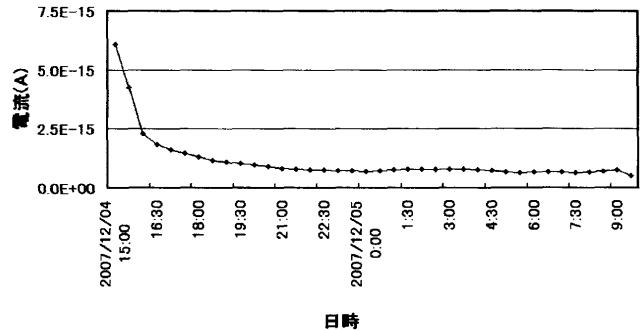
4. 測定結果

4.1 アルミ板をパラフィン被覆による効果

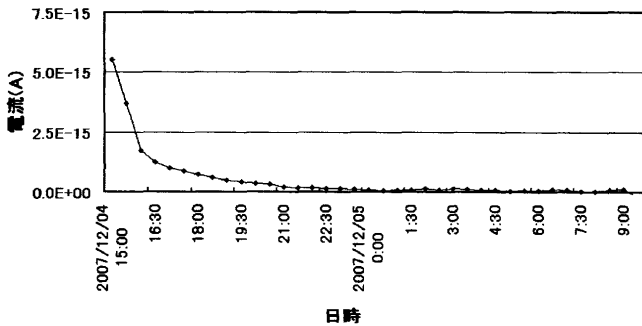
パラフィン被覆の効果を確認するため、試料 A と D の測定結果を比較する。図 8 において、(a)~(c) は試料 A、(d) は試料 D の測定結果である。(a) はバックグラウンドによる電離電流、(b) はその電離電流と試料に流れる電流の合計値である。従って両者の差(c)が真の電流値である。(d) はパラフィンの被覆を施さない試料の電流値で、バックグラウンドによる電離電流分を取り除いた真の電流値である。結果を比較すると、電流値の時間的な傾向は同じであるが、電流値が 8 倍以上の差がある、このことからアルミ板をパラフィンで覆ったことによる沿面電流の抑制効果が確認できた。



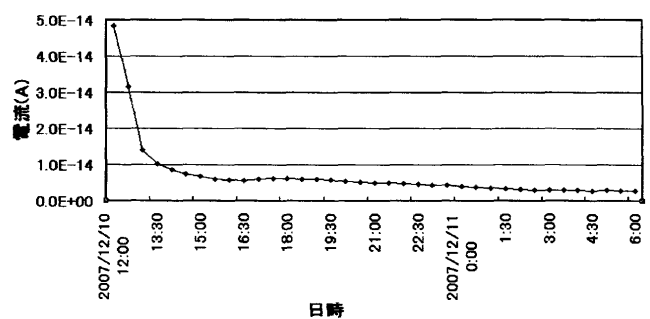
(a) バックグラウンドによる (電離) 電流



(b) 試料に流れた電流+バックグラウンド電流



(c) (a),(b)の差から求めた真の電流値



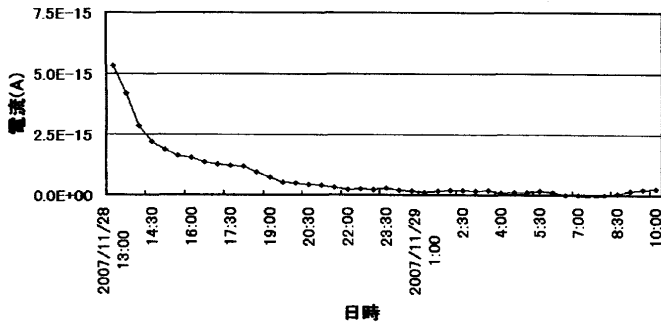
(d) パラフィン被覆のない試料の真の電流値

図8 厚さ 5mm の試料を用いた測定結果

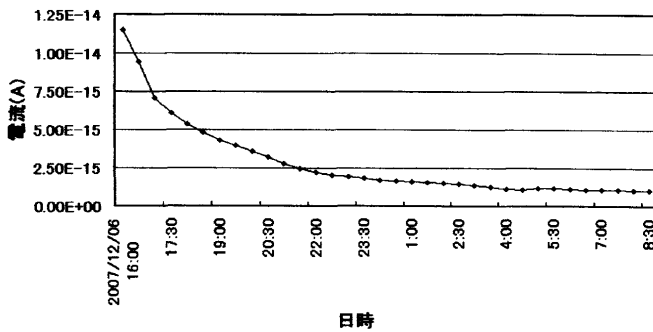
4.2 試料厚さによる違い

試料 B と C の電流測定結果を図 9 に示す、この結果もバックグラウンドによる電離電流分を取り除いた真の電流値である。

図 8 (c)と比較すると、電流レンジは若干異なるものの、同じ傾向を表しており、試料の厚さによる抵抗値の違いと考えられる。



(a)試料 B (厚さ 10mm) の真の電流値



(b)試料 C (厚さ 15mm) の真の電流値

図 9 異なる厚さの試料の測定結果

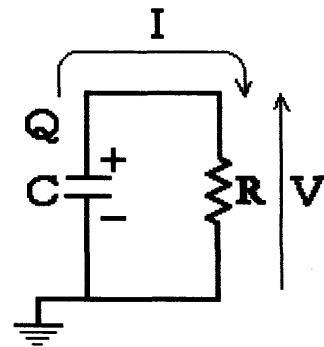


図 9 測定装置の等価回路

R : 測定試料

C 正極側 : 磁気浮上電極

C 負極側 : 電離箱本体

5mm 厚の試料の測定結果を(1)式に当てはめ、最小二乗法で時定数 $R \cdot C$ を求め、その値をもとに計算した結果を図 10 に示す。なお、計算値①、②の違いは(1)式の初期値(I_0)の取り方の違いである。

グラフを見ると、計算値と測定値が一致しているとはいえない。計算に用いた(1)式は、抵抗値が一定であるという前提のもとに成り立つ関係であり、測定した試料の抵抗値が無視できないほど変動しているためではないかと考えられる。

5. 検討

5.1 RC 等価回路との比較

測定に使用した電離箱は、中心に正電荷を帯びた導体(電極)が固定され、周囲は接地された導電性の円筒状容器であるため、中空の同心円筒型コンデンサとみなすことができる。

また、中心電極と電離箱容器の間に高抵抗試料を接続しているため、図 9 のような RC 直列回路と等価である。

この回路において、電離箱の静電容量を C、電極電荷を Q とおけば、初期電流を I_0 とおけば、試料に流れる電流の時間変化は以下の式で表される。

$$I = I_0 \exp(-t/RC) \dots\dots\dots (1)$$

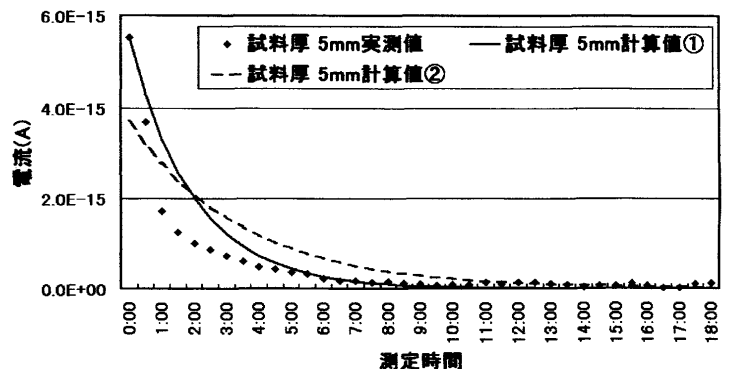
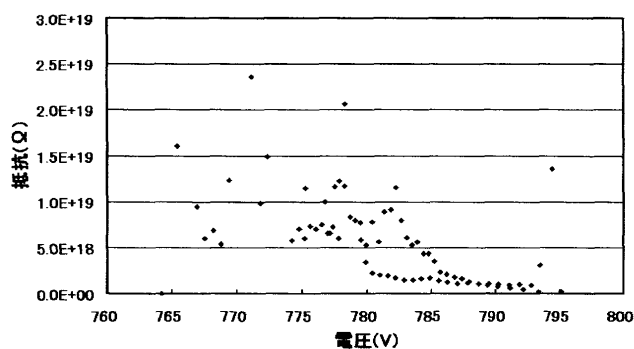


図 10 厚さ 5mm の試料の最小二乗法による計算結果

5.2 抵抗の電圧による変動

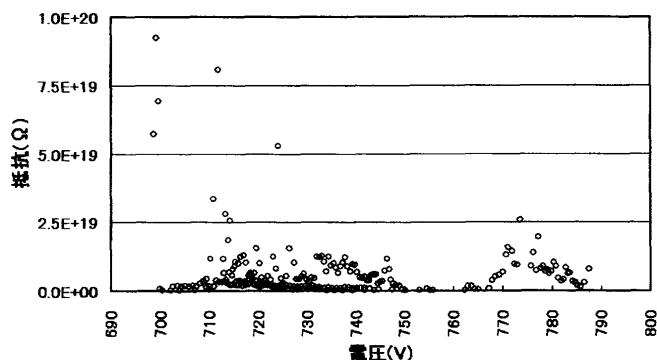
今までの測定で得られた電流, 電圧より求めた



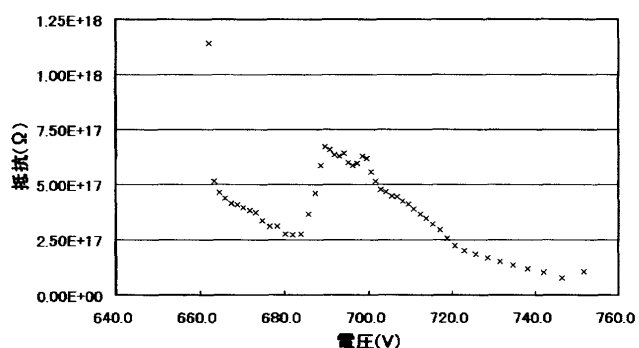
(a) 試料厚さ 5mm

抵抗値と電圧との関係を図 11 (a)~(c)に示す。

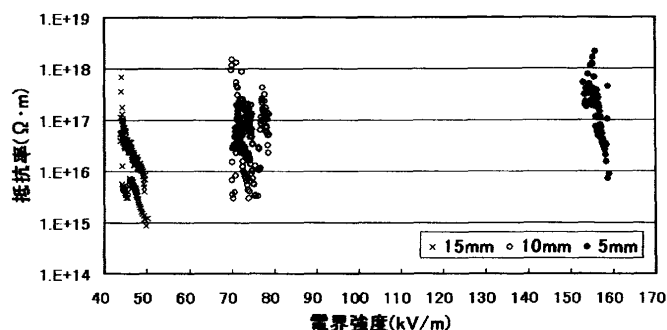
また電界強度と抵抗率との関係を図 11(d)に示す。



(b) 試料厚さ 10mm



(c) 試料厚さ 15mm



(d) 抵抗率 (対数表示) - 電界強度

図 11 各試料の抵抗値-電圧及び抵抗率-電界強度の関係

(a)~(c)より抵抗値は電圧と共に変動しており、 $R=一定$ という条件は成立しない。また抵抗値は、電圧の高い領域ほど安定していることがわかる。

(d)のグラフより、3種類の試料の抵抗率はいずれも $10^{15} \sim 10^{18} (\Omega \cdot m)$ の範囲内にある。この値は理科年表などに示してあるパラフィンの抵抗率

($10^{15} \sim 10^{18} (\Omega \cdot m)$) とほぼ一致する。

しかし、このグラフを見る限りでは、抵抗率と電界強度の間には相関性は見られない。

5.3 試料厚さの違いによる抵抗値の補正

試料の抵抗値 R は、抵抗率 ρ と試料厚 d 、断面積 S より $R = \rho \cdot d / S$ で求められる。

10mm 厚, 15mm 厚の試料の抵抗値は、5mm 厚試料の抵抗値よりそれぞれ 2 倍, 3 倍大きいと仮定し、5mm 厚の測定値を先の(1)式に当てはめ、厚さの比で換算した計算値を実測値と比較した (図 12)。

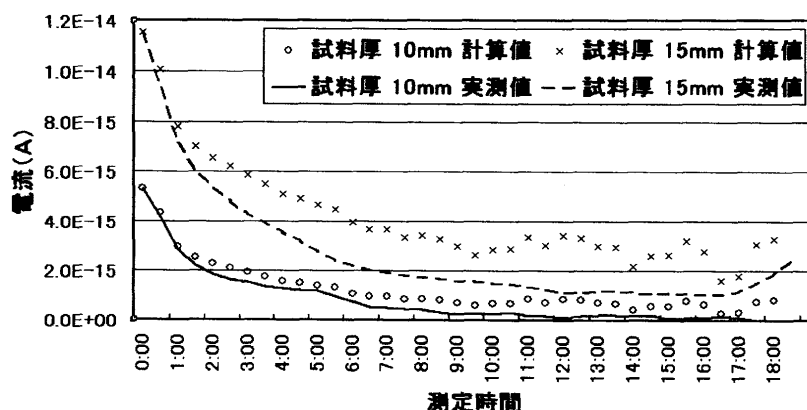


図 12 厚さ 5mm の測定結果をもとに 10mm, 15mm に換算した結果

15mm 厚の計算値は電流が小さくなるにつれて実測値とのずれがかなり大きくなってしまふ。それに対し、10mm 厚の計算値は実測値とのずれが小さい。従つて、この計算方法は測定結果を評価するうえで役に立つ。

基準となる試料の測定データ数を増やすことにより、実測値との差は少なくなつていくものと考えられる。

6. 結論

超高抵抗材料の 1 つであるパラフィンの電気抵抗を測定した。試料の沿面電流を抑制する対策を施した結果、抵抗値にして $10^{18} \Omega$ 以上の測定ができた。

抵抗値と試料サイズから抵抗率を算出し、サイズに関係なく理科年表にある抵抗率と一致した。

今回の測定では、抵抗率と電界強度の各試料厚さとの相関は見られなかつた。今後さらに測定回数を増やし、検討を行つていく。

参考文献

- 1) 高尾 利治 「電気計測」 オーム社(1975)
- 2) 山内 二郎 「電気計測便欄」 オーム社(1971)
- 3) 川口 俊郎 「磁気浮上電離箱とこれを用いた低レベル放射線自動計測システムの開発に関する研究」 九州大学学位論文(2003)
- 4) 福田 隆 「超高抵抗装置と誘電体特性への応用」 九州産業大学大学院修士論文(2007)