

水を使った静電気コップについての研究

静岡県立科学技術高等学校

自然科学部 2 年 青柳銀太 飯塚友也 富田雄矢 原田理功

1. 研究動機

静電気コップとはコップにアルミ箔を巻いて二つ重ねたもので、電気をためることができる(図 1)。コンデンサと同じ仕組みであり、電気をためて触ると痛みを感じる。この静電気コップをアルミ箔の代わりに水を使っても作ることができる(図 1)と知った。この静電気コップに電気をためて触るとアルミ箔のみのものよりも強い痛みを感じた。水を使った静電気コップの仕組みについてはアルミ箔のみのコップと同じだと考えられるが、なぜ不導体である水を使ったコップのほうが電気をためやすいのかという疑問が残った。二つのコップを比べるためにネオン管を使い発光の強さを確認した。ネオン管とは高い電圧がかかると強く光るものである。これをアルミ箔のみのコップと、内側のアルミ箔を水に変えたコップの二つで比べるため静電ジェネレーターを使って同じ回数ハンドルを回して充電した。その結果(図 2)、水を使ったコップのほうが強く光った。さらに静電容量を計ると水を使ったコップの方が値が大きかった。そこで私たちは、水を使った静電気コップの方が静電容量が大きくなる理由を明らかにしたいと思い研究を始めた。



図 1 静電気コップ(左:アルミ箔 2 層 右:水とアルミ箔)

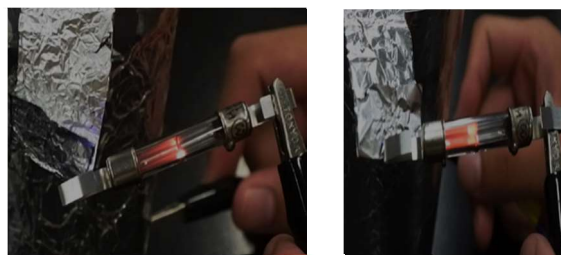


図 2 ネオン管を使った比較
(左:アルミ箔 2 層 右:水とアルミ箔)

2. 静電気コップが電気をためる仕組み

静電気コップはコンデンサと同じ仕組みであると考えることができる。

(1) コンデンサとは

コンデンサとは、図 3 のような電気素子の一種で電気をためる性質を持つ。仕組みをみると、図 4 のように二つの導体とその間にある誘電体から成っている。図 5 のように電池によって導体 B から導体 A に電子が流れると、電子を失った導体 B はプラスに帯電する。このプラスとマイナスの電荷が引き合い、電気をためることができる。図 5 では誘電体は空気又は真空である。



図 3 コンデンサ

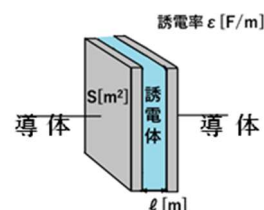


図 4 コンデンサの構造

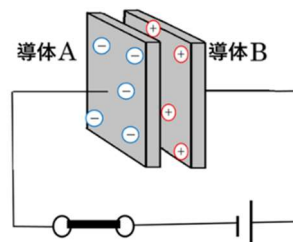


図 5 電気がたまる仕組み(コンデンサ)

(2) 静電容量とは

静電容量とはコンデンサにどのくらい電荷を

ためられるかを表す値である。この実験では静電容量測定器(図6)という器機を使って静電容量を測定した。静電容量測定器の仕組みは電流を流して、一定の電圧になる時間を測ることで静電容量を求めるというものである。

(3) 誘電率とは

コンデンサの2つの導体間に挟む物質を誘電体といい(図4)、物質ごとに誘電率が決まっている。静電容量は誘電

率 ϵ と面積 S に比例し、誘電体の厚さ ℓ に反比例する。
$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{\ell} \quad \cdots \text{式 1}$$

(4) 静電気コップが電気をためる仕組み

静電気コップの場合は、図7の左図のようにまず2層のアルミ箔の内側に電子が流れる。そうすると外側のアルミ箔から電子が逃げてプラスに帯電し、電気がたまる。水を使ったコップの場合も同様に、アルミ箔を通して内側の水に電子が流れる。そうすると外側のアルミ箔がプラスに帯電し、電気がたまると考えられる(図7右図)。

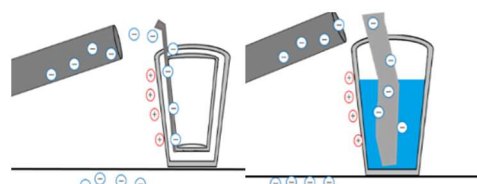


図7 電気がたまる仕組み

(左:アルミ箔2層 右:水とアルミ箔)

3. 準備物

クリアカップ (材質: ポリエチレンテレフタレート(略して PET)) 6 種類 (60mL、110mL、210mL、375mL、420mL、600mL)、ポリスチレンカップ、水道水、アルミホイル (厚さ $11\mu\text{m}$)、静電容量測定器

4. 目的

水を使った静電気コップの静電容量がアルミ箔のものよりも大きい理由を明らかにすることを目的として研究を行う。方針としては以下の通りである。

- (1) 水の中でどのように電荷がたまるのかを明らかにするため、静電容量が「水の体積」と「コップと水との接触面積」のどちらとの関係が強いかなを確認する。
- (2) アルミ箔2層の通常のもの、と、水とアルミ箔を組み合わせたものなど組み合わせで静電容量がどのように変化するかを確認する。

5. 実験1

(1) 目的

静電容量は水の量を増やすと増加した。これは水の体積とコップと水の接触面積のどちらに関係しているのか確認する。

(2) 実験方法

まず、外側にアルミ箔をまいたコップの内側に水を 10mL ずつ増やしていき、静電容量を水を増やす度に測定する。また、体積および表面積のデータを取りやすくするために水を 10mL ずつ入れるたびに水面を線で記録した(図8)。



図8 水面の記録

(3) コップと水の接触面積の求め方

コップの面積はコップを展開して得られる扇型として求める(図9)。上下二つの円の円周の比から計算で面積を求める。また、計算値の正確性を確認するために、方眼用紙に、展開したカップ(図10)を写し実測したものと計算で得られる最大面積とを比較した。

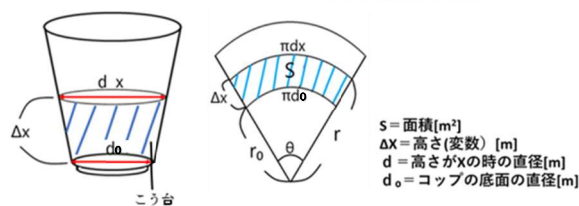


図9 接触面積の考え方

(4) コップと水の接触面積の立式

コップの下端に X 座標の原点をとった時(図 11)、こう台の高さを x_0 、こう台から Δx 上部まで水を入れることを考え、下端から x に水面がある時のコップとの接触面積を x から求める式を考える。扇型の面積を求める式は(式 2)のようになる。

$$S = (\pi r^2 - \pi r_0^2) \times \frac{d_0 \pi}{2\pi r_0} \quad \dots \text{式 2}$$

r と r_0 の比(式 3)を(式 2)に代入すると(式 4)が得られる。

$$\frac{r_0}{r} = \frac{d_0 \pi}{d \pi} \quad \text{より} \quad r_0 = \frac{d_0 \Delta X}{d - d_0} \quad \dots \text{式 3}$$

$$S = \frac{\pi \Delta X (d_x + d_0)}{2} \quad \dots \text{式 4}$$

ここで、 d_0 と dx を x より求められるようにするために、コップの直径を底面から 0.5cm ごとに測定し x と d の関係式を得る(図 12)。関係式を代入し求めた以下の式(式 5)を接触側面の面積として使用した。

$$S = \frac{\pi(x - x_0)\{(x - x_0)a + 2b\}}{2} \quad \dots \text{式 5}$$

(5) 結果と考察

図 13 を見ると静電容量と接触面積の関係を示したグラフは直線に近い線を描くことがわかる。一方横軸を体積にしたグラフ(図 14)は曲線になっている。このことから、体積より表面積の方が静電容量と関係が強いことがわかり、水を使った静電気コップでは水がコップに接している場所に電荷が貯まっていると考えられる。

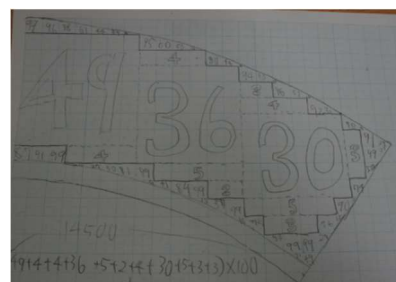


図 10 最大面積の実測

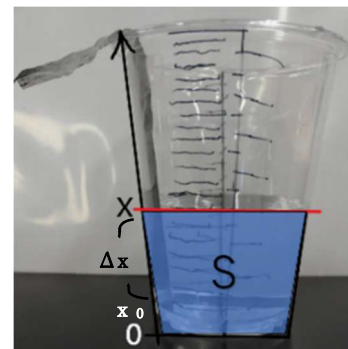


図 11 X の取り方

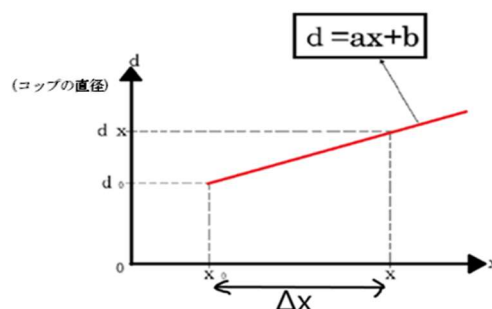


図 12 直径 d のグラフ

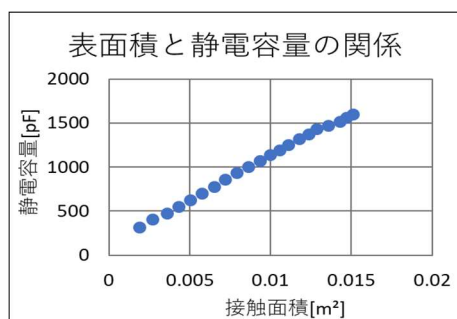


図 13 水の表面積と静電容量の関係

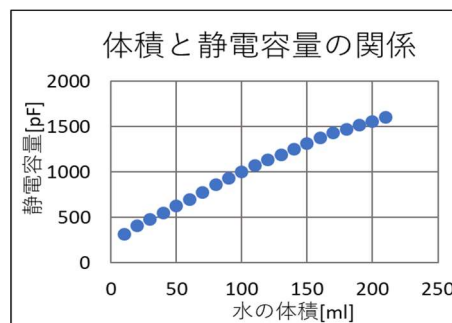


図 14 水の体積と静電容量の関係

6. 実験 2

(1) 目的

導体部分のアルミ箔と水の組み合わせを変えたとき、静電容量がどのように変化するかを調べる。

(2) 3 種類のコップの構造

図 15 のようにアルミ箔 2 層、水とアルミ箔、水 2 層の 3 種類を用意して実験を行った。アルミ箔 2 層はアルミ箔を巻いたコップを重ねたもの、水とアルミ箔はアルミ箔を巻いたコップに水を入れたもの、水 2 層は水を入れたコップを重ねた構造をしている (図 16)。



図 15 静電気コップ

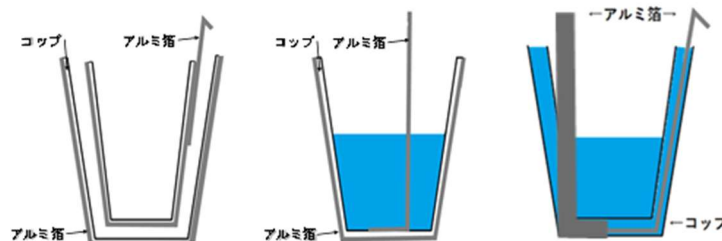


図 16 静電気コップの構造

(3) 実験方法

① アルミ箔 2 層

アルミ箔 2 層の測定では 2 つ重ねたコップのうち、内側のコップのアルミ箔の高さを 1 cm ずつ高くしていき (図 17)、そのたびに静電容量を測定していった。



図 17 ①で使うコップ

② 水とアルミ箔、水 2 層

水とアルミ箔、水 2 層の測定ではコップの中に入っている水の量を 10mL ずつ増やし、そのたびに静電容量を測定していった (図 18)。また、水 2 層の測定の際は 2 つのコップの間に入っている水の量を毎回満杯にしてから測定していった。

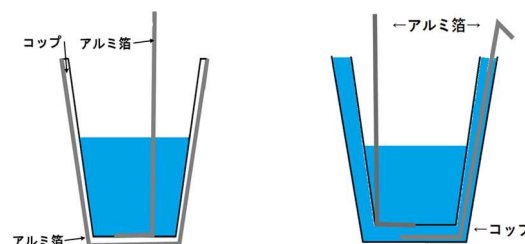
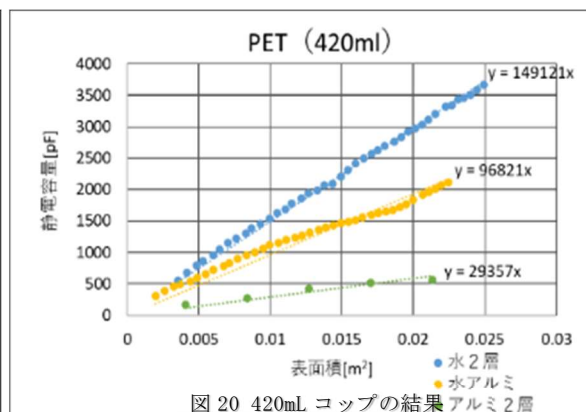
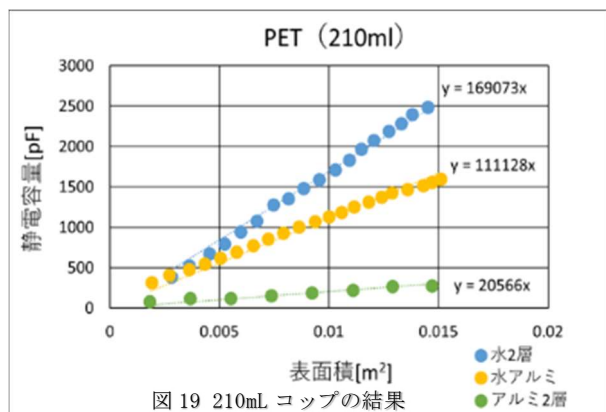


図 18 ②で使うコップ

(4) 結果

図 19 のグラフは実験 2 の結果 (210mL) をまとめたもので、横軸は表面積、縦軸は静電容量を示している。どの組み合わせでも比例の関係になっていてアルミ箔 2 層、水とアルミ箔、水 2 層の順に静電容量の変化が大きいことがわかる。特に水 2 層とアルミ箔 2 層では傾きに 8 倍以上の差がある。また、420mL のカップの結果 (図 20) を見ても同様の結果になっている。



7. 誘電率の計算

実験 2 の結果から導体部分の組み合わせを変えると静電容量が大きく変化することがわかった。そこで静電気コップの誘電率と静電気コップの素材である PET の誘電率を比較する。誘電率の式(式 6)よりグラフの傾き a は ε/ℓ と等しくなる(式 6)。

$$C = \varepsilon \frac{S}{\ell} \quad \varepsilon = a\ell \quad \dots \text{式 6}$$

(式 6) より誘電率 ε を求める。ここで誘電体の厚さ ℓ はコップの厚さとして、測定によって求めた平均値を使った。コップの厚さの測定においてはコップを輪切りにして(図 21)各段 8 か所(図 22)をノギスで測り(図 23)、その平均値を使用した。厚さの平均は表 1 のようになり、その値を使って求めた誘電率が表 2 になる。誘電率は 6 種類の大きさのコップで求めた。表 3 の PET の誘電率と比較すると、アルミ 2 層のコップでは約 $1/7$ 、水とアルミ箔のコップでは約 $1/2$ であるのに対して、水 2 層のコップからは PET に近い誘電率が出ている。このことから水 2 層のコップは誘電体の PET を電極ではさみこむ理想的なコンデンサになっているのではないかと考えた。これを別の素材でも確かめるために、ポリスチレンコップでも同様に実験を行った。結果のグラフとそこから求めた誘電率を図 24 と表 4 に示す。これらの結果から、ポリスチレンコップでもアルミ箔 2 層、水とアルミ箔、水 2 層の順に静電容量が大きくなっていることがわかる。ポリスチレンの誘電率(表 5)と比較すると水とアルミ箔のものが最も近い値ではあるが、水 2 層がその値を上回っていることがわかる。ただ、表 6 をみると PET と比べてポリスチレン 3 種類の静電気コップの結果にそれほど大きな差はでなかった。また、PET の結果を細かく見るとコップのサイズが大きくなるほど水 2 層の誘電率は大きくなっているなどコップの素材や大きさによっても静電容量に違いがでるのかもしれない。

表 4 計算した誘電率(ポリスチレン) [F/m]

	アルミ箔2層	水とアルミ箔	水2層
ポリスチレンコップ	20.1×10^{-12}	22.7×10^{-12}	26.5×10^{-12}

表 5 ポリスチレンの誘電率 [F/m]

	比誘電率	誘電率
ポリスチレン	2.4~2.6	23.0×10^{-12}



図 21 輪切りにしたコップ

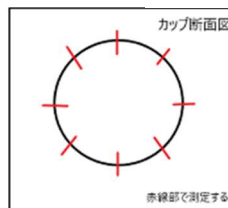


図 22 測定位置



図 23 厚さの測定

表 1 コップの厚さ

コップサイズ (mL)	厚さ [mm]	厚さのバラつき
60	0.17	0.15~0.22
110	0.18	0.17~0.19
210	0.17	0.16~0.17
375	0.19	0.18~0.20
420	0.21	0.24~0.34
600	0.23	0.21~0.25

表 2 計算した誘電率

コップの種類	アルミ2層 [F/m]	水アルミ [F/m]	水2層 [F/m]
cup60		16.7×10^{-12}	25.1×10^{-12}
cup110		14.5×10^{-12}	26.7×10^{-12}
cup210	3.70×10^{-12}	19.9×10^{-12}	30.0×10^{-12}
cup375		12.4×10^{-12}	30.9×10^{-12}
cup420	7.05×10^{-12}	23.2×10^{-12}	35.7×10^{-12}
cup600		17.2×10^{-12}	36.9×10^{-12}

表 3 PET の誘電率 [F/m]

	比誘電率	誘電率
真空の誘電率		8.85×10^{-12}
PETの誘電率	2.9~3.0	26.6×10^{-12}

※比誘電率を 3.0 として計算

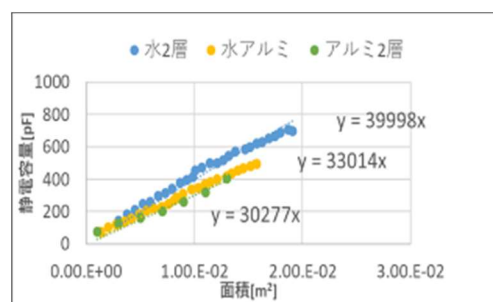


図 24 面積と静電容量の関係

表 6 誘電率の比較 [F/m]

	ポリスチレン	PET
参考値	23.0×10^{-12}	26.6×10^{-12}
水2層	26.5×10^{-12}	30.0×10^{-12}
水とアルミ箔	22.7×10^{-12}	19.9×10^{-12}
アルミ箔 2 層	20.1×10^{-12}	3.70×10^{-12}

8. 考察

誘電率の計算結果より、水を使った静電気コップはアルミ 2 層のコップより誘電率が高く、コップの素材に近い値であることがわかった。また、水 2 層のコップの誘電率は、コップの素材の誘電率を上回っているものもあった。私たちの研究の目的は、なぜ水を使うと静電容量が大きくなるのかを明らかにすることだったが、ここまでの結果から水を使った静電気コップは理想的なコンデンサに近いことがわかった。そう考えると、水を使うことで静電容量が上がるのではなくアルミ箔を使うことで静電容量が下がっているのだということがわかる。そこでアルミ箔を使うと静電容量が下がる理由を考えた。各コップの断面を考えるとどれも同じように見える(図 25)。そこで実験中のことを振り返ると、実験をする中でアルミ箔がコップに密着していた方が静電容量が高かったことから、アルミ箔とコップの間にできる空気層がその原因であると考えて(図 26)、その厚さを計算した。まず、誘電体部分がコップと空気層であると考えて、合成静電容量を求める式を立てた。この時の合成静電容量 C は図 27 のような直列接続のコンデンサと同様に考えることができる。プラスチックコップ部の静電容量を C_1 、空気部の静電容量を C_2 とおくと次のような式になる。

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C} \quad \cdots \text{式 7}$$

それぞれの容量は誘電率と表面積、厚さで求められるので

$$C_1 = \frac{\varepsilon S}{\ell} \quad \cdots \text{式 8} \qquad C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} \quad \cdots \text{式 9}$$

式 8、式 9 を代入すると、式 10 が得られる。

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\ell \varepsilon_0 + d \varepsilon} S \quad \cdots \text{式 10}$$

これをグラフ(図 28)の式 $C = aS$ と対比して d を求めると(式 11)が得られる。

$$d = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 - a \ell \varepsilon_0}{a \varepsilon} \quad \cdots \text{式 11}$$

空気層の厚さを計算した結果は表 7 のようになった。水とアルミ箔の組み合わせでは空気層は数 $10 \mu\text{m}$ であり、PET もポリスチレンも同様の厚さであるのに対してアルミ 2 層ではポリスチレンが水とアルミの時の約 2 倍なのに対して PET では約 0.5mm と大きな値になった。これはポリスチレンと PET の材質によるものと考えられる。ポリスチレンコップは固く形状も安定しているため密着度が高く、空気層が薄いのは納得できる。一方で PET は材質が柔らかく、ボコボコとしていて 2 つのコップが密着していない。そこから PET でのアルミ箔 2 層は空気層が厚いと考えられ、結果とはさほど矛盾していないと考えられる。従って計算結果はどれも空気層の厚さらしい値になっており、アルミ 2 層やアルミと水の静電気コップの誘電率が小さく出たのは、はさまれた空気層のためであると結論づけられる。

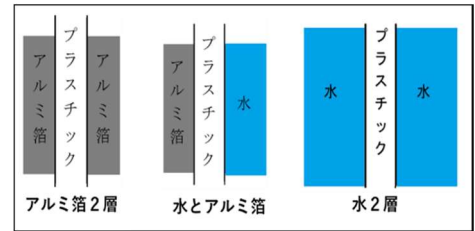


図 25 考えていた静電気コップの構造

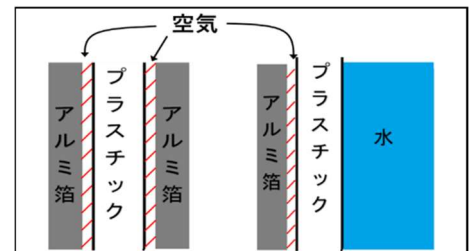


図 26 実際の静電気コップの構造

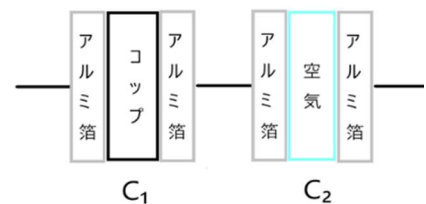


図 27 合成静電容量の考え方

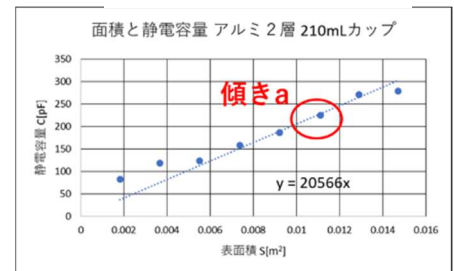


図 28 傾き α

9. 結論

実験1の結果から水を使った静電気コップは、水がアルミ箔のような導体と同じように極板として振る舞い、コップをはさんだ両側で帯電して電気をためていると考えられる(図29)。また、実験2からはアルミ箔を使ったコップではアルミ箔を巻いたときにできる空気層によって静電容量が下がっているのに対して、水を使った静電気コップでは空気層ができないため理想的なコンデンサに近くなり、静電容量が大きくなると考えられる。私たちは水を使うことで静電容量が大きくなると考えていたが、実際はアルミ箔を使い、空気層ができることで静電容量が下がっていたのである。

表7 計算した空気層の厚さ

	PET	ポリスチレン
水とアルミ箔	0.028	0.026
アルミ箔2層	0.496	0.050

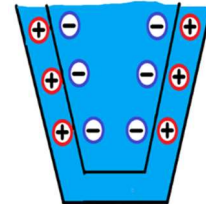


図29 水を使った静電気コップに
電気が貯まる仕組み

10. 今後の課題

今後の課題は水2層だとPET, ポリスチレンの参考値より大きい誘電率が出る(表8)のはなぜかを明らかにすることだ。私たちは実験を水道水で行っていたので、その中に含まれるイオンが関係しているのではないかと考えて、水の代わりに脱イオン水や塩水を使って追加実験を行ったところPETの水2層では脱イオン水と水道水、食塩水で顕著な違いが出たが(図30)、水とアルミ箔のコップやポリスチレンのコップでは大きな違いは見られなかった(図31, 図32, 33)。コップの材質や水のイオンの含有量などによって静電容量を増やす要因があるかもしれないと考えられる。今後さらに詳しく調べていきたい。

表8 参考値を上回る水2層の誘電率

	ポリスチレン	PET
参考値	23.0×10^{-12}	26.6×10^{-12}
水2層	26.5×10^{-12}	30.0×10^{-12}

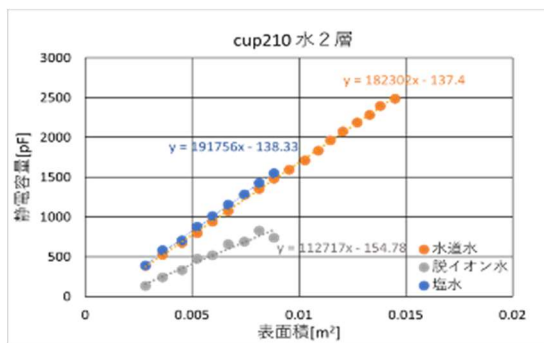


図30 210mLカップ 水2層の水を変えた実験

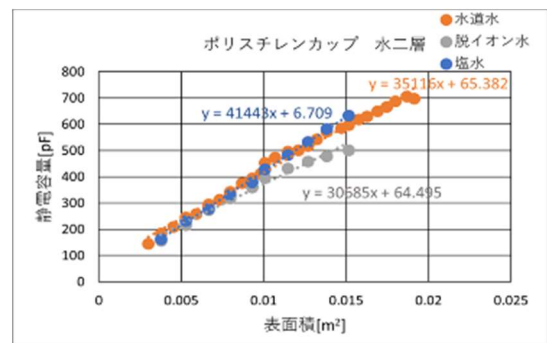


図31 ポリスチレンコップ 水2層の水を変えた実験

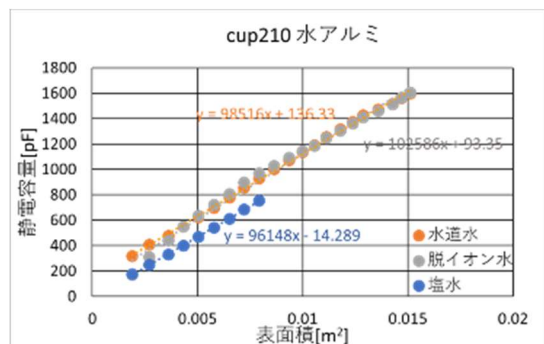


図32 210mL コップ 水アルミの水を変えた実験

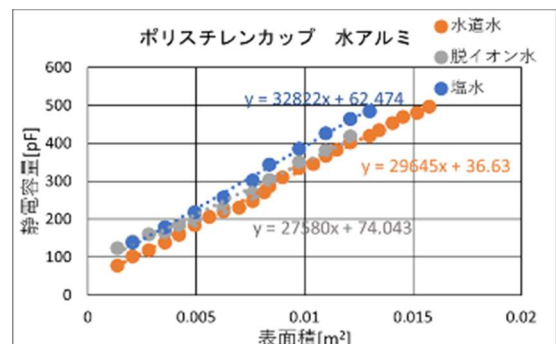


図33 ポリスチレンコップ 水アルミの水を変えた実験

11. 参考文献

- ・ 各種物質の誘電率表 www.ydic.co.jp/technology/table.html
- ・ 電気基礎 1 新訂版 実教出版株式会社
- ・ 電気基礎 2 新訂版 実教出版株式会社
- ・ ものづくりハンドブック 2 「たのしい授業」編集