

- 目 次 -

はじめに	1
研究内容	2
(1)電気二重層コンデンサの自作	2
(2)充電・放電回路	2
予備実験	3
1. ほんとうに電気がたまるのか	3
(1)乾電池の電極(炭素棒)をつかったコンデンサ	3
2. 電気分解が始まる電圧の測定	4
(1)乾電池電極を使つての測定	4
(2)銅板電極を使つての実験	5
(3)11.4cm ² の銅板の静電容量	6
(4)銅板電極での電気分解が始まる電圧その2	6
(5)電気分解が始まる電圧の電極依存	7
3. 電解液「食塩水の濃度について」	8
(1)実験結果	8
(2)考察	8
4. 備長炭電極コンデンサの電気容量の測定	9
(1)測定回路	9
(2)充電特性	9
(3)充電時間の長さ	10
(4)備長炭電極コンデンサの放電特性の測定	11
5. シミュレートコンデンサの充放電特性	12
(1)シミュレートコンデンサの充電特性	12
(2)シミュレートコンデンサの放電特性	12
ここまでのまとめ	13
測定方法の工夫	14
1. コンデンサの容量測定方法	14
2. 容量計算方法の問題点	14
3. Q/V容量計算方法	15
4. Q/V容量計算方法のまとめ	17
5. コンデンサの容量計算における充電電流の影響	17
コンデンサの自作	18
1. コンデンサの自作	18
(1)コンデンサ1号機	18
(2)コンデンサ2号機	19
(3)コンデンサ3号機	20
(4)コンデンサ4号機	21
(5)コンデンサ5号機	22
2. コンデンサ自作での反省と考察	24
(1)電池になっている。	24
3. 備長炭型コンデンサの自作	25
(1)小型備長炭電極コンデンサの製作	25
(2)小型備長炭電極コンデンサの特性	25
(3)食塩水の濃度	25
(4)小型備長炭電極コンデンサ3個直列	26
コンデンサの充放電	27
1. コンデンサに蓄えられるエネルギー	27
2. 定電流電源装置による充電効率の向上	28
(1)コンデンサ充電時のエネルギー効率の計算	28
(2)定電流源での充電での効率	29
研究のまとめ	31
1. 自作小型備長炭電極コンデンサの性能と可能性	31
2. まとめ	32
3. コスト対効果	37
反省と今後の目標	37
参考	39
1. スイッチング型定電流電源	39
2. LED駆動回路	39
参考文献	39

自作電気二重層コンデンサを用いたエネルギー貯蔵の研究

栃木県立宇都宮清陵高等学校 科学研究部

はじめに

二次電池に変わって電力用電気二重層コンデンサの活用が注目を集めている。コンデンサは有害物質の使用もなく環境負荷が極めて少ない。さらに取り扱いが容易で長寿命など優れた特性を持っている。また基本的な構造が単純である。

自然エネルギーは不安定で有効にエネルギーを使うには電力を貯蔵するシステムが不可欠になる。そこでエネルギーの貯蔵に環境に優しい電気二重層コンデンサを利用することを考えた。コンデンサはニッカド電池などと比較して取り扱いが簡単で有害物質を使わないクリーンなデバイスで、この意味でも自作可能であると判断し、身近な材料でコンデンサを自作することに挑戦した。

現在 100F を超える容量のコンデンサも市販されている。しかし高価で手がでない。我々が目指すのは、身近な材料で自作でき、性能の悪さは大型化でカバーし、そして安価で、しかも簡単に自作できるコンデンサの開発である。コンデンサ利用の普及も目指した。

軒下に置くのであれば一斗缶程度の大きさになっても問題はないはずである。日中太陽電池で充電して、高輝度の発光ダイオードを一晚中点灯できる程度の電力を貯蔵できる電気二重層コンデンサが製作できないか研究した。

研究内容

(1)電気二重層コンデンサの自作

身近な材料を使ってどのようにすれば電気二重層コンデンサが自作できるのか研究する。お金をかければ市販されているコンデンサが購入できるのだから、安値で簡単に作るにはどのような方法があるかを常に意識した。そのために最初に話し合った結果、次の問題を解決する必要があると予想し、作りながら解決していくスタイルをとった。

- ・電解液に何を選べば良いのか
- ・電極としてどのような材料を選ぶか。電極としての構造・形状をどう選ぶか。
- ・コンデンサとしてどのような構造にするか。
- ・どの程度の大きさにすれば必要とする容量が得られるか。
- ・コンデンサとしての基礎的な特性をどのようにして測定するか。

(2)充電・放電回路

コンデンサは電流を流すと電圧が下がっていく。このままでは使いづらいので電圧を一定に保つ電子回路が必要になる。そこで効率の良い定電圧回路が必要になる。

手に入る部品で充電・放電回路の自作を試みる。そして電気二重層コンデンサと組み合わせたモジュールの自作を考える。

予備実験

電気二重層コンデンサについての知識が全くないので、コンデンサを自作する上で必要な知識や疑問点を解消する目的で色々な実験を行った。

1. ほんとうに電気がたまるのか

以前宇都宮清陵高校で開催した”ものづくり体験教室”で利用した電気二重層コンデンサ(10F, 2.5V)があったので、充電して豆電球をつないでみると、コンデンサであるのにかなり長い間点灯した。1本500円程度である。とりあえずこの容量を目標にコンデンサの自作を試みることにした。



(1) 乾電池の電極(炭素棒)をつかったコンデンサ

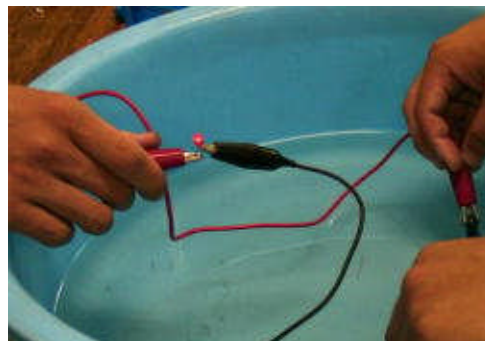
はたして電気がたまるかの検証実験である。電極に乾電池の炭素棒を利用し、電解液に塩化ナトリウム(食塩)を利用した。

電極は表面積が大きな物質が良いのでマンガン乾電池から炭素棒を取り出すことにした。はじめに手近にあったアルカリ乾電池を分解したが、アルカリ電池には炭素棒が利用されていないことをはじめて知った。

実験結果

精製水に電極を入れ炭素棒2本を浸し充電豆電球を接続、全く反応なし。そこで食塩を適当に溶かして再度実験。結果は同じである。

そこで豆電球に変えて赤色発光ダイオードを利用したところ見事に点灯した。この結果に満足して大きければもっとたくさん電気がたまると考えピーカでの実験をたらいに変えて実験した。



何か勘違いしているのではないかと顧問の先生に笑われた。しかし次のことが確認できた。

A. 充電電圧を上げすぎると電気分解が起こってしまう。

I. 電極の間隔を変えても殆ど影響がないようである。

ウ. 炭素棒をみの虫クリップでくわえて充放電した。放電の時の虫クリップを電解液中に浸すとLEDは消灯する。電圧が若干下がるためである。

あまりにも幼稚な実験であると笑われたが、LEDが点灯するかしらないかではコンデンサの容量を正確に把握できないので、正確に容量を測定する方法を考え、実験をする必要がある事を痛感した。



2. 電気分解が始まる電圧の測定

電解液に何をを使うかが問題になったが、「簡単に安値で身近な材料で作る」の方針の下で考えると「食塩水」しかないとした。そこでインターネットなどで検索してみると、はっきりとした値は見あたらず 1V 程度であることしかわからなかった。そこでとりあえず実測することになった。

電解液を流れる電流の変化から電気分解が始まったことがわかると考え、電極を食塩水につけて電圧を徐々に上げながら電流を測定する方法をとった。

測定の結果最初に得た値は約 1V であったが、コンデンサ 5 号機（試作品 5 番目）の性能を測定した時に 0.7V 程度で発生したことがわかった。電極によってかなり変化するとの記述が化学の参考書にあったと顧問の先生に聞いたため、電極を変えて電気分解が始まる電圧を測定した。

電気二重層コンデンサの試作品を作る前に電気分解が始まる電圧の測定を行った。後にわかったことは、 10cm^2 程度の面積の電極でも 0.25F（注意 $0.25\ \mu\text{F}$ ではない）もの容量が生じるために、電圧を少しずつ時間をかけて上昇させないと、コンデンサへの充電電流が生じるので、電気分解によって生じる電流を見失うことがわかった。

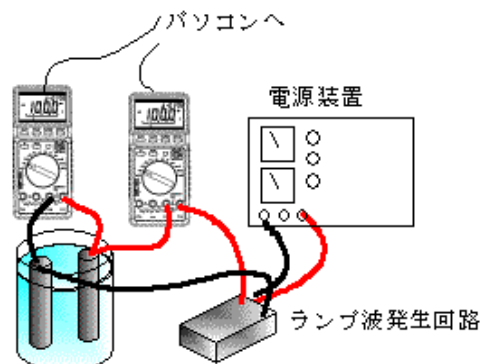
以下のその実験の記録（多くは失敗の記録）を測定を行った順に示す。

(1) 乾電池電極を使っでの測定

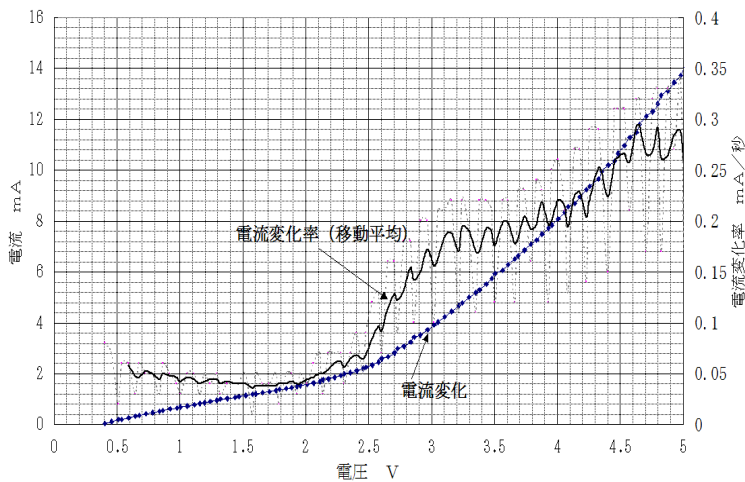
電極として単 1 マンガン電池を分解して得た炭素棒を利用した。

電圧を徐々に上げて、ついに電気分解が始まると充電電流が増大するだろうと考え、電圧と充電電流を測定してその変化を測定した。

デジタルテスターをパソコンに接続して、充電電流の値と電極間の電圧を 1 秒ごとに測定した。電源は時間に比例して電圧が上昇する装置（ランプ波発生回路）を使い、電圧を徐々に上昇させ電流を測定した。



電流-電圧特性(炭素棒電極)



炭素棒を電極にした時の電圧対電流のグラフをしめす。

このグラフは電圧ごとの流れ込む電流値と電流値の時間変化率(移動平均して滑らかにした)を示した。1V程度で電気分解は始まる聞いていたが、このグラフからは明確に読み取れなかった。2.5V付近で電流が増加したように見える。

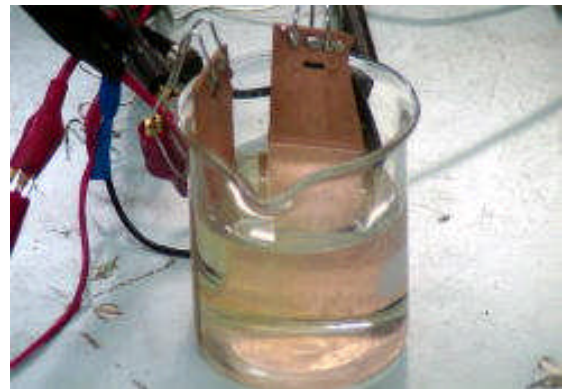
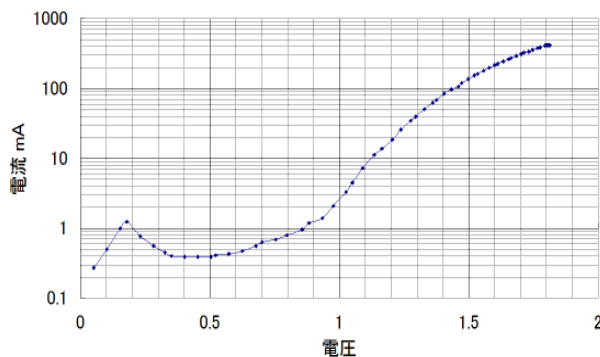
(2)銅板電極を使つての実験

炭素棒を電極にしたために電気二重層コンデンサに流れる充電電流と、電気分解が開始した事による電流が加算されて流れたと考えた。そこでコンデンサとしての容量が小さくなるように電極を銅板(プリント基盤を利用)に変えて実験した。

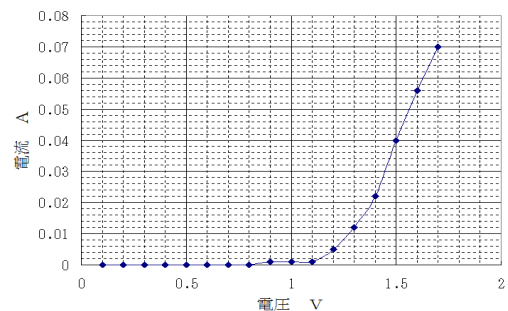
実験の結果1V程度の電圧で陰極の銅板から気体の発生が認められ、右のグラフのように電流が急激に流れ始めた。

そこでデジタルテスタをパソコンにつなぎより精密に測定することにした。

銅板電極 電圧-電流 特性



電気分解開始電圧 銅板



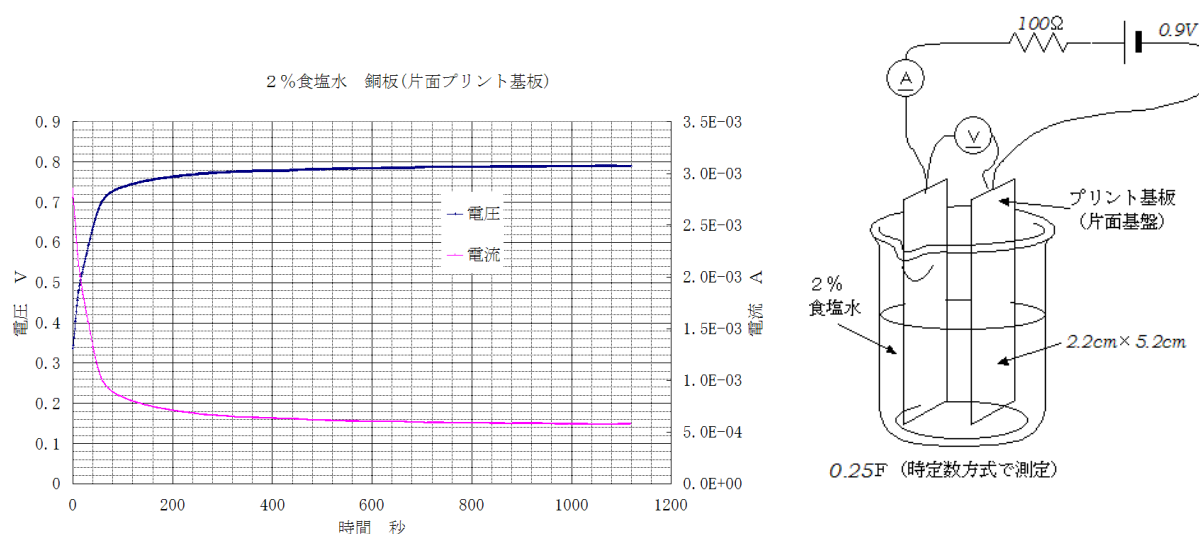
再度測定した結果、このグラフのように、おおよそ1V以上から電気分解が始まることがわかった。なお500mA以上の電流が流れヒューズを切ってしまった。

(3) 11.4cm²の銅板の静電容量

電気二重層コンデンサについての知識がほとんど無い状態で始めた基礎実験であったため振り返ると混乱がかなりあった。

第一点は、電気二重層コンデンサの容量がきわめて大きいと言う事である。この認識が不足していたことで、電気分解が始まる電圧は電極に流れる電流を観測すれば、何ボルトで電流が増加するかで簡単に測定できると誤解した。

実際は 2.2cm × 5.2cm のプリント基板を電極として漏れ電流を測定しようとする回路を組み立て、0.9 Vの電圧を加えて流れる電流を測定し漏れ電流を求めようとした。そのとき時定数方式（測定方法の工夫参照）での静電容量を測定する方法と同じやり方であった事に気づき電流値と電極間電圧を測定し、静電容量もあわせて測定した。



その結果面積 11.4cm²の銅板の静電容量がなんと 0.25 F もあった。また電流は 1080 秒後に 570 μA で一定になり、この値を漏れ電流と考えた。(2%食塩水)銅板は実験のたびにナイロンたわしで表面を磨いているので、表面積は 11.4cm²よりは広いと思われるが、それでも大変大きな静電容量が得られると驚いた。

(4) 銅板電極での電気分解が始まる電圧その2

予備実験では時間に比例して電圧が上昇する装置(ランプ波発生回路)を使って、電流変化を測定して電気分解が始まる電圧をスマートに求めようとした。しかし銅板でさえも 0.25 F の容量があるため、コンデンサを充電する電流によって隠され、明確なポイントが見いだせなかった。

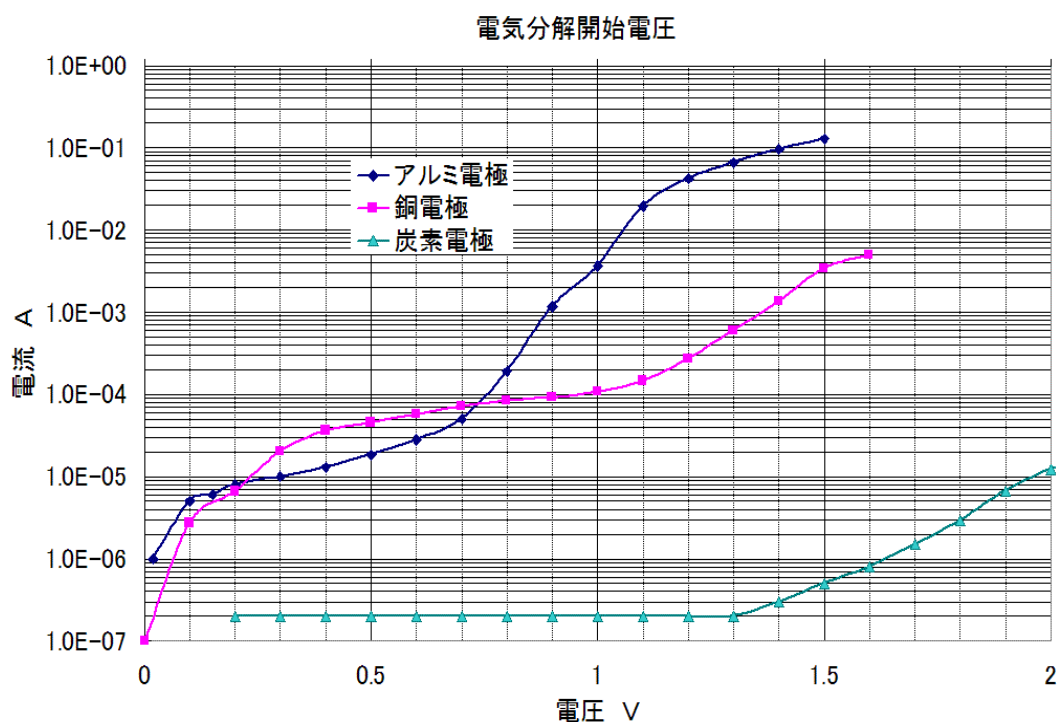
ランプ波発生回路から直接電極につないで実験をしたとき、電気分解が始まって過大電流が流れ、テストのヒューズを切ってしまう失敗をした。この反省から、抵抗を間に挟んで測定を行ったが、コンデンサを充電するのに時間がかかるようになっただけで測定結果が改善できたわけではなかった。

結局、電極に電源装置をつなぎ、電源装置の電圧を手動で少しずつ上げて時間をかけて電流を測定する方法がもっとも確実なやり方であることが判明した。

(5)電気分解が始まる電圧の電極依存

電気分解が始まる電圧は1 V程度であると予備実験の結果から考えていたが、それ以下の電圧でも電気分解が始まっていると思われる結果が得られた。電極によって電気分解の始まる電圧が変化するのが再度実験した。

電極として銅，アルミ，炭素の3種類を選んだ。なお炭素は0.5mm シャープの芯を利用した。銅・アルミは10cm²の面積である。



予備実験では約1 Vで開始する事を確認したが、電極は銅であった。上のグラフを見るとやはり銅を電極にした場合は1 Vから電流が増加し始めている。しかしアルミを電極にした場合は0.7 V程度から増加し始めている。

炭素を電極とした場合、表面積が大きく、電気二重層コンデンサとしての容量が大きくなるため、電気分解のため電流が増加したのか充電電流かが判別しづらいため、0.5mmのシャープペンの芯を利用した。電気分解は約1.3 Vから始まると見積もることができる。なお、シャープペンの芯を利用したので流れる電流の絶対値は大変小さくなっている。

電極によって電気分解の始まる電圧は変化する。
炭素電極の場合約1.3 Vである

アルミニウム：0.7 V

銅：1.0 V であつた。

3. 電解液「食塩水の濃度について」

水溶液の濃度の最適値を探するために実験を行った。電解質として食塩を利用し、精製水に0%～4%の重量%になるように食塩を溶かし、濃度を変えて充電後の電圧の変化を読み取った。電極には2枚のアルミ板を利用し、間に和紙を挟んでショートを回避する構造のコンデンサを形成し、3Vの電圧で10秒間充電し、その後10秒毎にデジタルテスタで電圧の値を読み取りグラフ化した。

(1)実験結果

次のグラフが得られた。2%濃度の時がもっとも長い時間電圧を維持している。

(2)考察

精製水の時と比較して、食塩を溶かしたときの方が長い間電圧を維持している。このことから電気二重層が形成されることがわかる。

グラフより2%と3%濃度の場合が電圧を長い時間維持していることがわかる。10秒間の充電時間で、完全に電気二重層に充電し切れていない場合も考えられるが、4%濃度の場合電圧の降下が3%より大きいので濃度には最適な値があると考えられる。おそらく、濃度を濃くしすぎると漏れ電流が増大するのではないかと判断した。

「濃度の最適値は2～3%である」

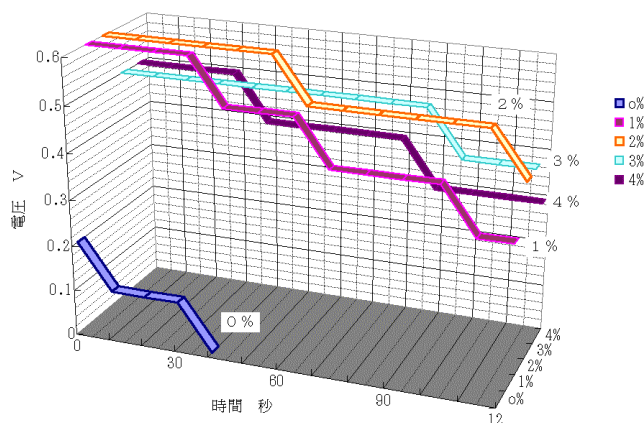
予備実験で最適な値は2%を得たが、10秒間の一定充電時間でその後の電圧の変化をテスタで測定した。かなり粗い実験で得られた結果に合理的な理由が見いだせない。そこで自作した小型備長炭電極コンデンサに2%の食塩水、飽和食塩水と2とおりの電解液で特性を測定した。参照 -3.備長炭型コンデンサの自作

その結果から、食塩水の濃度を濃くすると、コンデンサの容量は若干増加する程度だが内部抵抗はかなり小さくなる事が分かる。また、漏れ電流も特に大きくなったとは考えづらかった。

食塩水を濃くすると内部抵抗が小さくなる

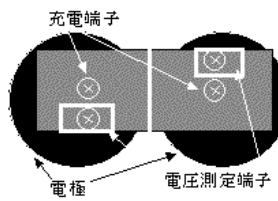
従って電解液の濃度は高ければ高いほど良いとの結論に達した。

食塩濃度と充電後の電圧変化



4. 備長炭電極コンデンサの電気容量の測定

電解液に食塩水（400m Lに 1 モルの濃度，約 6.5%の重量%），電極に備長炭（消臭・お風呂用として市販されている）を用いて電気容量を測定した。



電極は写真のように左右絶縁したプリント基板を間隔を保持する目的で利用し，プリント基板に電極はタッピングで固定した。

充電を行う端子と，電圧を測定する端子をべつとする4端子法を取り入れ，電極の電圧を正しく測定する工夫をした。

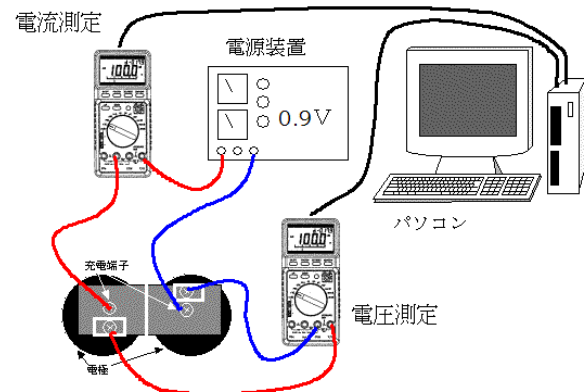
充電電極と電極表面との間の電気抵抗は，デジタルテストで測定した結果 1 ~ 2 程度あった。



USB

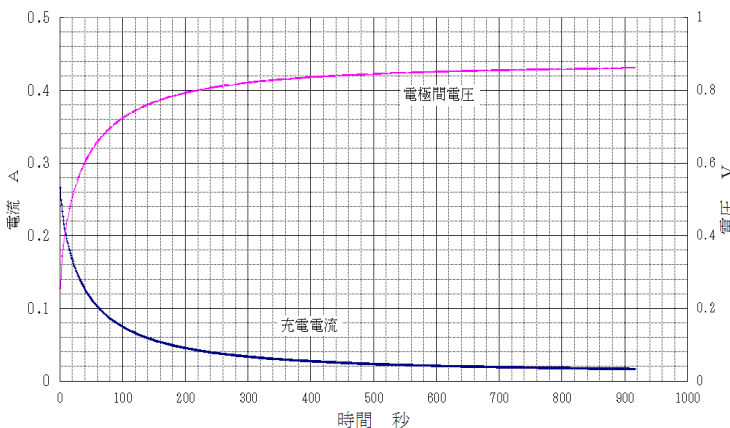
(1)測定回路

図のようにデジタルテストをパソコンに接続して，回路に流れる電流と電極間の電圧を 1 秒ごとに測定した。利用したテストは SANWA PC510 で計測ソフトとしてフリーソフトの Digital Multi Meter Viewer を使った。



(2)充電特性

備長炭電極 充電特性



定電圧電源で 0.9 V の一定電圧を加えて流れる電流と電極間の電圧を 1 秒ごとに測定してグラフにした。次に 917 秒間に流れた電流を数値積分(1 秒ごとの電流値を単純に足し算した)するとコンデンサーに流れ込んだ電荷が求まる。

$$917 \text{ 秒間に流れ込んだ電荷} : Q = 35.86 \text{ C}$$

$$917 \text{ 秒後の電極間電圧} : V = 0.860 \text{ V}$$

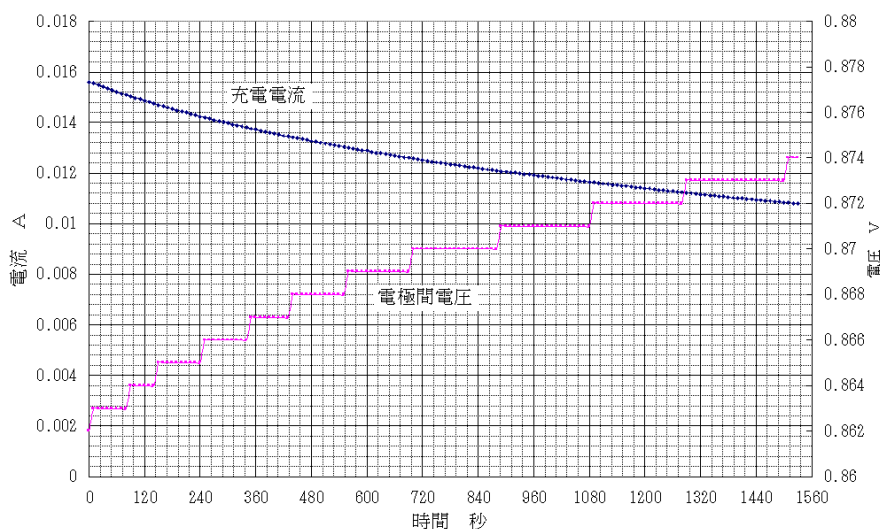
この結果容量は $Q = CV$ より $C = Q \div V$ で計算すると

$$\text{コンデンサの容量} : C = 41.7 \text{ F}$$

以上の結果になった。

15 分間以上充電をしても、約 17 mA の電流が流れ続けていた。そこで継続してさらに 25 分間充電を続けた。このときの充電電流と電極間電圧を測定した。

充電電流と電極間電圧



追加で充電した 25 分間にコンデンサに流し込まれた電荷は 19.5 C にも及ぶ。従って 35.86 C と併せて 55.36 C の電荷が充電された。この時の電極間電圧が 0.874 V なので、容量は 63.6 F にも及ぶ。2447 秒間もの充電時間がかかったがきわめて大容量のコンデンサといえる。

備長炭を使った電気 2 重層コンデンサの容量： 約 64 F
 (但し 2447 秒の充電時間を必要とした)

(3) 充電時間の長さ

充電に大変長い時間がかかる。まるで充電電池を充電しているようである。電源とコンデンサの電圧が同じになると充電電流は流れなくなるが、このようにいつまでも流れ続けるので若干不安になった。しかし

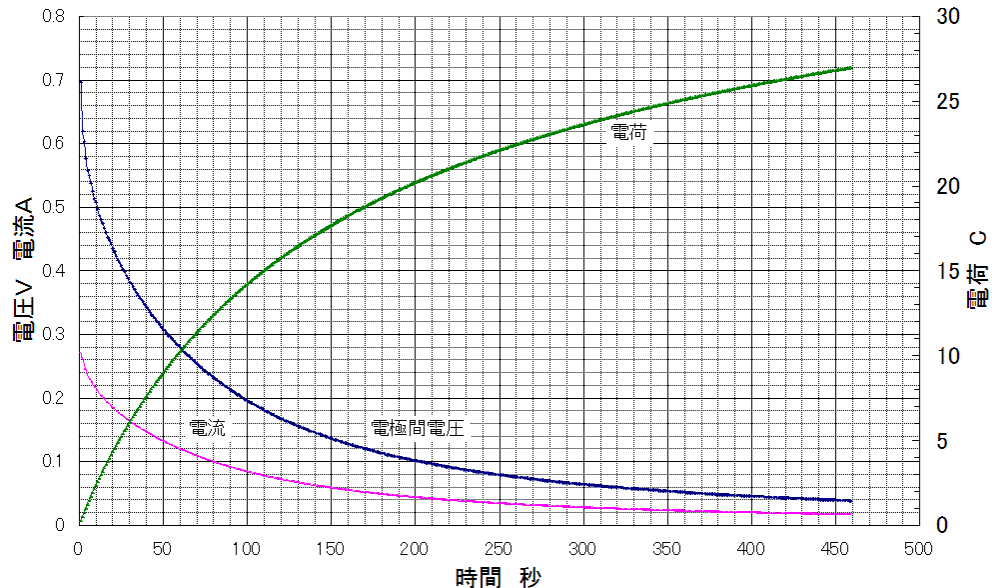
コンデンサの内部抵抗が大きく、そのために十分な電流が流れず時間がかかる。と考えられることと、徐々にではあるが充電電流が減っているので「コンデンサの電極間の絶縁が不十分で電流を流し続けるいわゆる漏れ電流とは考えづらいと判断した。

しかし、40 分以上充電電流が流れ続けるのには大変驚いた。市販品の 10F のコンデンサと比較すると全く様子が違う。今までの常識が通用しないと強く思った。

(4)備長炭電極コンデンサの放電特性の測定

コンデンサに本当に電荷が貯まっているかを検証した。40分間充電したコンデンサから流れ出す電流を電極間の電圧とともに1秒ごとに測定した。

放電特性



電流計



電圧計



0.874V に充電されたコンデンサに電流計を接続し放電し、同時に電極間の電圧を測定した。

電流計を接続した瞬間に 電圧：0.697V 電流：0.270A となるなお電流計の内部抵抗：1.5Ω である。

459秒間放電すると 電圧：38mV 電流：16mA

となる。この間に放電した電荷は 電荷：27.0C であり充電量 55.36C の約 49%を放電したことになる。しかし少なくともコン

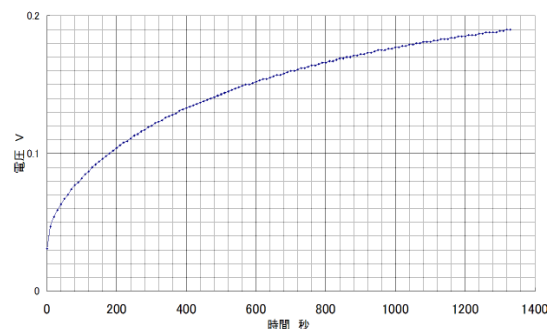
デンサとして働いていることがわかり安心した。ところで、電極間電圧が十分に小さくなった後、電流計を外し、電圧を測定すると電圧が上昇する現象を観察した。今までの実験でも生じた現象である。電気二重層コンデンサ特有の現象のようである。

コンデンサの放電特性より内部抵抗 r は

$$r = \frac{0.874 - 0.697}{0.270} = 0.66$$

この結果 内部抵抗はおおよそ 0.7Ω 程度 となる。

放電後の電圧の回復



5. シミュレートコンデンサの充放電特性

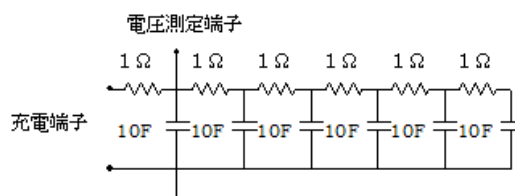
備長炭電極を食塩水に浸した電気二重層コンデンサの充放電特性を見ると、今まで想像していたコンデンサとはかなり違う。そこでなぜこのようになるのか市販品の 10F のコンデンサを使って比較することにした。

この写真は備長炭電極を撮影した写真である。大変細かな溝がたくさんありこの程度の拡大写真でも表面積が大変大きいことがわかる。



電極に使った備長炭の拡大

テスターで充電端子と備長炭電極の各部分の抵抗を測定すると 1 ~ 2 の電気抵抗が存在する。それぞれの部分の表面は電気二重層コンデンサを構成するのであるから、多くの微小コンデンサが抵抗を間に入れて並列に接続されていると考えられる。備長炭電極のコンデンサは 60 F 程度の容量を持つことが見込めたので、手持ちの 10 F のコンデンサ 6 個を使って次の等価回路を作って充放電特性を比較した。



(1) シミュレートコンデンサの充電特性

備長炭電極と同じように 0.9 V で充電して同じように電極間の電圧と充電電流を測定した。917 秒後の 電極間電圧 : 0.847 V 充電電荷 : 64.4 C $Q = C V$ より

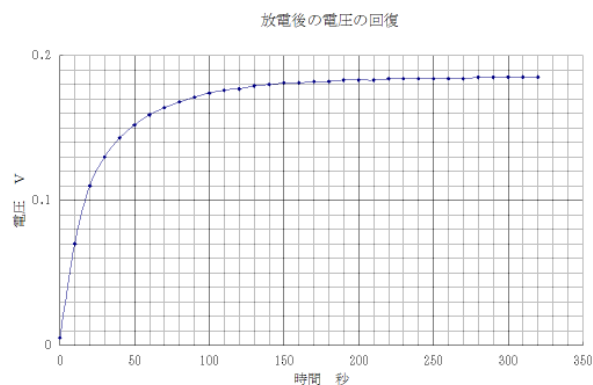
$C = Q \div V$ で見積もられるコンデンサの容量は $C = 76 \text{ F}$ となる。10 F の電気二重層コンデンサ 6 本を 1 の抵抗を介して接続してあるので 60 F となると考えたが大きめに見積もられている。

(2) シミュレートコンデンサの放電特性

電極間電圧が 0.833V で電流計を接続、電極間電圧 0.794 V、電流 0.289 A で放電開始 459 秒間放電すると 46.9 C の電荷を放出する。64.4C の 73% を放出する。

一端充電端子をショートし、その後開放したときの電極間電圧の回復も同じように再現でき徐々に電圧が上がってくる。等価回路のような構成になっていれば必ず生じる現象であることがわかる。

備長炭電極で作ったコンデンサと同じ現象が生じることから、多くの微小コンデンサが抵抗を間に入れて並列に接続されているという考え方は正しい事がわかる。



ここまでのまとめ

備長炭を電極とした電気二重層コンデンサの特性を測定して次の事がわかった。

食塩水を電解質として利用する場合，水の電気分解の電圧，約 1 V までの耐電圧のコンデンサとなる。

詳しく調べると電極に電気分解が始まる電圧は違い，

アルミニウム電極 0 . 7 V

銅電極 1 . 0 V

炭素電極 1 . 3 V

であることがわかった。

直径 3 cm，長さ 10 cm の備長炭を電極とした場合，おおよそ 60 F 程度の電気容量のコンデンサとなる。ただし充電電流が流れなくなるまでに大変長い時間がかかる。内部抵抗はおおよそ 0.7 Ω であった。

微小コンデンサが抵抗を介して接続された等価回路となっている。しかも内部抵抗が大きく大電流で充放電することは出来ない。

の構造になっているので，コンデンサの両端をショートして電圧をゼロにしても，両端を開放すると電圧が徐々に上昇する現象が生じる。

備長炭電極をタッピングで電極に接続する構造では接触抵抗が 1 Ω 程度生じる。

食塩水の濃度を濃くするとコンデンサの内部抵抗は小さくなる。

測定方法の工夫

1. コンデンサの容量測定方法

電気二重層コンデンサの容量は大変大きいので、テスタなどの容量測定レンジでは測定できない。文献1によると一定電圧を加え、充電開始からコンデンサの電圧が充電電圧の0.63倍になるまでの時間が60～100秒になる抵抗Rを接続して、このを測定して $C = \tau / R$ から測定すると説明されている。(便宜上、時定数測定方式とする)

この方法で容量を計算すると備長炭電極コンデンサでは $\tau = 32$ 秒, $R = 2.5$ より 12.8F と計算される。シミュレートしたコンデンサの場合 $\tau = 158$ 秒, $R = 2.5$ より 63.2F となる。この結果を比較すると10Fのコンデンサを6本1の抵抗を介して6本並列に接続してあるので正しい結果が出ている。この方式では備長炭電極コンデンサの容量は10F程度となる。 $R=2.5$ としたところに問題があると考えられる。

我々が採用した容量の測定法は、充電電流を積分してコンデンサに流れ込んだ電気量Qをもとめ、そのときのコンデンサの電圧Vを測定し $Q = CV$ から $C = Q / V$ で計算する方法である。(電流積分方式と命名する) 原理的に正しい方法であると考えられるが時定数測定方式と比べて容量を大きめに見積もる傾向がある。特に測定時間を長くすればするほど容量は大きくなる。ここで二つの方法での容量を比較したのが次の表である。

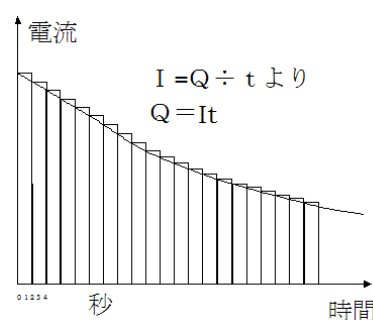
	備長炭電極	シミュレートC
時定数測定方式	12.8 F	63.2 F
電流積分方式	64 F	76 F

電流積分方式は測定時間を長くすればするほど容量を大きく見積もることになる。仮に漏れ電流が流れてると、その電荷分を容量に換算してしまう。

2. 容量計算方法の問題点

静電容量の値を測定する方法として今回の実験のために思いついた電流積分方式であったが、原理的には正しいと思うが、漏れ電流が大きいと大きな誤差になってしまう事がわかった。

この方式は電流の定義から $I = Q \div t$ より $Q = I t$ とし t を1秒にとり図のように加算(積分)するやり方である。電流とともにコンデンサの電圧も測定しているのでコンデンサに蓄えられていくエネルギーも求めることが出来る優れた方式と自負していた。電流がゼロになるまで加算すれば確実な方式であるが、備長炭電極の電気二重層コンデンサの場合、漏れ電流を見積もることが大変困難なので再度検討する必要がある。



時間	電圧	電流	電荷	容量
0	0.106	0.0602	0.0602	0.57
1	0.122	0.0597	0.1199	0.98
2	0.133	0.0587	0.1786	1.34
3	0.137	0.0581	0.2367	1.73
4	0.145	0.0578	0.2945	2.03
5	0.151	0.0572	0.3517	2.33
6	0.157	0.0567	0.4084	2.60
7	0.163	0.0564	0.4648	2.85

それに対して時定数 と抵抗 R から求める方法は，電圧計とストップウォッチがあれば測定可能で大変簡単である。

3. Q/ V 容量計算方法

備長炭電極電気二重層コンデンサの容量を再度測定した。電源とコンデンサの間に 10 の抵抗を接続し，電流計の内部抵抗及び備長炭電極の内部抵抗を加えて 12.5 の合成抵抗での充電，及び 6.0 の合成抵抗での充電で時定数測定方式で容量を計算した。

抵抗	2.5	6.0	12.5
秒	32	454	600
容量 F	12.8	76	48

この表のように大きく値がばらついているのでどれが正しいか判断がつかない。そこで電流積分方式を改良した。この方式はどこまでの時間電流を積分すれば良いか判断がつかず，長時間積分すると漏れ電流も積分されるのでどうしても容量が大きく見積もってしまう問題点があった。そこで次のような方式を考えた。

$$Q = C V \text{ より}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q_{100} - Q_{50}}{V_{100} - V_{50}}$$

ここで Q₁₀₀ : 100 秒間に流れた電荷 V₁₀₀ : 100 秒後のコンデンサの電圧

Q₅₀ : 50 " V₅₀ 50 "

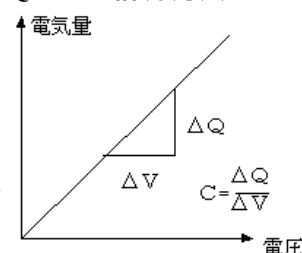
として 2 点間の差をとって計算する。2 点の取り方を任意に選べるので，充電初期の電流が急激に変化することでの計測誤差の増大から逃れることができるはずである。この方式で容量を計算した。今まで計測した備長炭電極コンデンサ，さらに 10 F コンデンサ (2.5 直列) とシミュレートコンデンサに対してもこの方式で容量を計算した。

抵抗	2.5	6.0	12.5	シミュレート C	10F
Q ₁₀₀ C	12.6667	6.672	4.9404	18.6323	8.69531
Q ₅₀ C	8.1307	3.660	2.6757	10.8302	6.7766
V ₁₀₀ V	0.721	0.411	0.338	0.498	0.840
V ₅₀ V	0.630	0.330	0.272	0.396	0.718
容量 F	49.8	36.4	34.3	76.5	15.7

計算した値を一覧にまとめたものが上の表である。今までの計算方式と比較してもっともばらつきが少なく妥当な計算方法であると考えられる。そこで電流を数値積分してえたデータを用いて，このような方法でこの計算する方法を Q/ V 計算方法と呼ぶことにする。

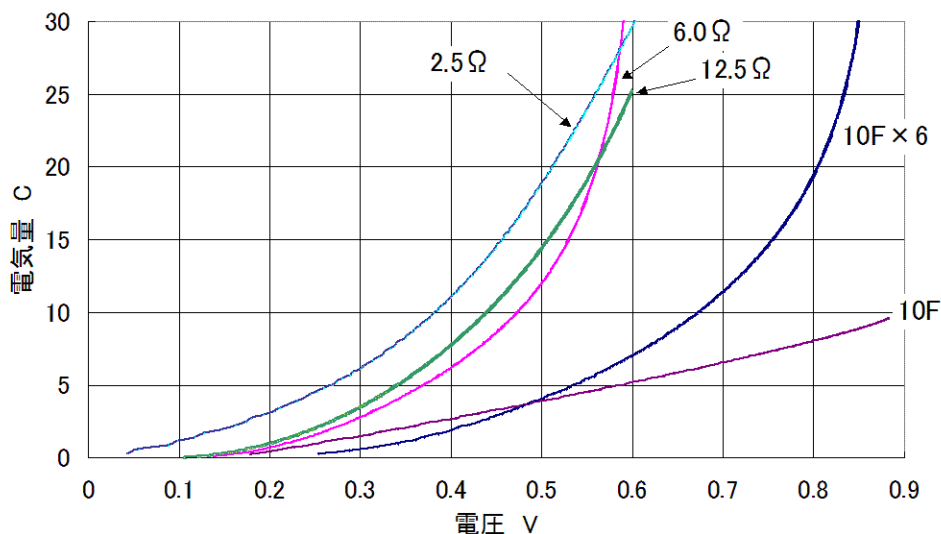
この表を見ると，備長炭電極の容量は充電する電流の大きさによって容量が変化するように見える。

コンデンサの容量 C が一定ならば $Q = C V$ となり，コンデ



ンサにたまった電気量はコンデンサの電極間の電圧に比例する。そこで表の測定で得られた電気量と電圧の関係をグラフにして比較した。

備長炭電極 電気量 対 電圧



グラフの10Fは10Fの電気二重層コンデンサを2.5Ωの抵抗を直列に入れて0.9Vで充電したときの電気量と電圧のグラフである。理論と同じで直線になっている。

10F×6はシミュレートコンデンサのグラフで指数関数的なグラフになっている。このことから抵抗を介してコンデンサが次々に接続された等価回路ではこのような変化をすることがわかる。そして、グラフの傾きがコンデンサの容量を表すので、満充電に近い状態で容量を測定すると大変大きな容量を示すことがわかる。なお6.0Ωのグラフは、他のグラフと違って、電解液が（塩水）に黄土色の濁り（ビスのさび）が出たときに測定したので漏れ電流が大きくなっていた可能性がある。

Q/V計算方法で50秒と100秒の2点間で計算したが、時間で決めると直列に挿入した抵抗値の違いから電圧がかなり違い、上のグラフのように満充電に近い場合やそうでない場合があり得るので、得られた容量に客観性がなくなる。そこで2点間の選び方を満充電の30%、及び50%の電圧になる点を可能な限り選び容量を計算する事にする。

抵抗	2.5	6.0	12.5	シミュレートC	10F
Q V30% C	0.2654	2.0572	2.5796	5.0098	1.1685
Q V50% C	2.8435	8.5627	10.75696	14.4752	3.3478
V 30% V	0.254	0.272	0.269	0.269	0.267
V 50% V	0.448	0.450	0.450	0.45	0.456
容量 F	13.3	36.5	45.2	52.3	11.5

この2点の選び方は、コンデンサを充電するときと比較的大きく電流・電圧が変化する部分であるので、測定誤差や計算での桁落ちが回避できるポイントである。今後この方法で2点を決め、Q/V計算方法で容量を見積もることとする。

4. Q/ V 容量計算方法のまとめ

コンデンサをショートし十分に放電する。

容量を測定するコンデンサに電源装置を接続し，電流，電圧を 1 秒ごとに測定する。

電気量の計算方法 電流 × 時間 = 電気量で以下のように数値計算する。

時間s	電圧V	電流A	電荷
0	0.106	0.0602	0.0602
1	0.122	0.0597	0.1199
2	0.133	0.0587	0.1786
3	0.137	0.0581	0.2367
4	0.145	0.0578	0.2945
5	0.151	0.0572	0.3517
6	0.157	0.0567	0.4084
7	0.163	0.0564	0.4648

← 0.0602 + 0.0597 で計算
以下も同様に計算する。
1 秒ごとの電流の計測
||
電気量

測定したデータの電流を加算していき，時間毎に流れ込んだ電気量を計算する。

電源電圧の 30% の電圧： $V_{30\%}$ ，及びそれまでに流れ込んだ電気量： $Q_{V30\%}$ を求める。

電源電圧の 50% の電圧： $V_{50\%}$ ，及びそれまでに流れ込んだ電気量： $Q_{V50\%}$ を求める。

次の式で容量 C を求める

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q_{V50\%} - Q_{V30\%}}{V_{50\%} - V_{30\%}}$$

なお，充電するとき，たとえば直列に挿入する抵抗の値が，コンデンサの内部抵抗と同じ値であると，つないだ瞬間に電極間の電圧が，電源電圧の 50% になってしまう。従って抵抗の選び方に注意が必要である。また，このような場合 2 点間の選び方を変更する必要がある

5. コンデンサの容量計算における充電電流の影響

抵抗	2.5	6.0	12.5
容量 F	13.3	36.5	45.2

備長炭電極の電気二重層コンデンサの容量は，容量測定の際の充電電流が小さい方が大きな値を示す。この理由は，内部抵抗がかなり大きいために，内部抵抗による電圧降下が端子間電圧に加算されて測定されるために，少ない電荷でもコンデンサの電圧が高くなるためである。特に内部抵抗の大きなコンデンサを大きな電流で充電すると特に目立つことになる。

また，急激に充電電流を流す場合には，低速なテストを使つての測定であるために読み飛ばしが生じるので，この影響を若干受けるとも考えられる。

内部抵抗の大きなコンデンサを充電する場合は少ない電流で長時間充電するやり方で容量を計算した方が誤差は少なくなると思う。

コンデンサの自作

1. コンデンサの自作

予備実験の結果を参考にして実際にコンデンサを製作することにした。顧問の先生からは、備長炭に針金を巻き付けて、塩水を満たしたバケツに備長炭を放り込めばコンデンサになるのではないかと、電圧が足りなければバケツコンデンサを3～4個直列に接続すれば良いのではないかとアドバイスをもらったが、もう少し格好の良いコンデンサを作ろうと考え、たくさんコンデンサを作った。その失敗の記録である。

(1)コンデンサ1号機

電解液の濃度の最適値をさぐったときに利用したアルミ電極に、備長炭をグラインダーで細かく砕いて接着剤でアルミに塗布して電極とした。

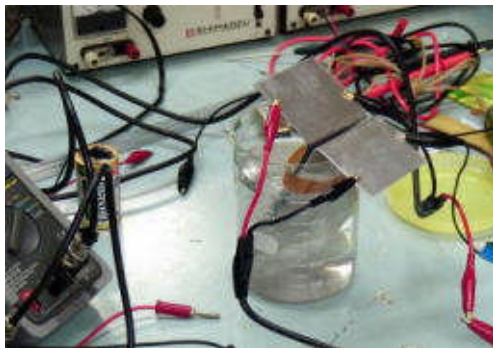


コンデンサにならなかった失敗

アルミに炭が固定できず塩水が炭で黒くなった。

(2)コンデンサ2号機

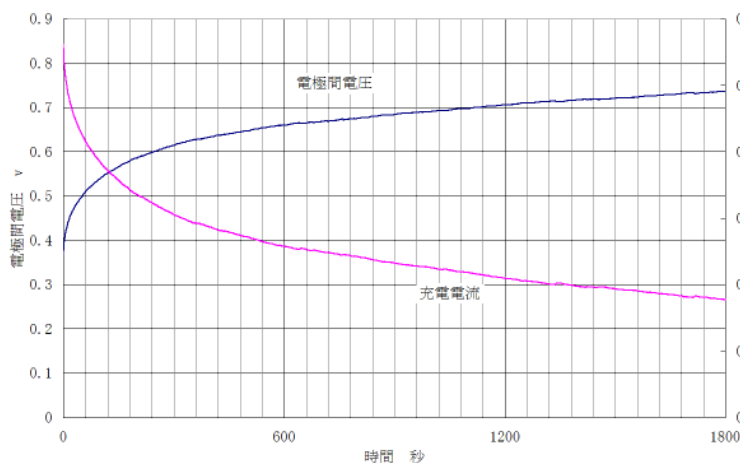
1号機は備長炭をグラインダーで細かく粉にして電極に貼り付けたが失敗。2号機は家庭用冷蔵庫庫脱臭剤の活性炭をアルミに接着剤で固定して電極とした。



活性炭を電極としてアルミと電氣的に良好に接続するために、接着剤が乾く前に万力で十分に圧力をかけて密着させた。電極の面積は $6\text{cm} \times 8\text{cm}$ である。

この2枚の電極の間にショート防止のためにキッチンペーパーをはさみ、両電極をセロハンテープで軽く固定しばらけないようにした。この電極を2%濃度の食塩水を満たしたビーカーに浸し、0.9Vの電圧を加え、端子間電圧と流れ込む電流を1秒ごとに測定した。なお電流計の内部抵抗は1.5Ωである。

コンデンサ2号機



測定結果

Q/V 容量計算方法で容量を計算した。

$V_{30\%} 0.369, Q_{V30\%} 0.2812$
 $V_{50\%} 0.567, Q_{V50\%} 31.6014$

$C = 158\text{F}$

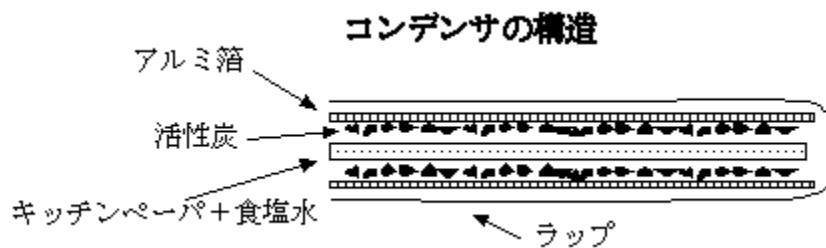
内部抵抗 = 1.14

2号機の容量 = 158F

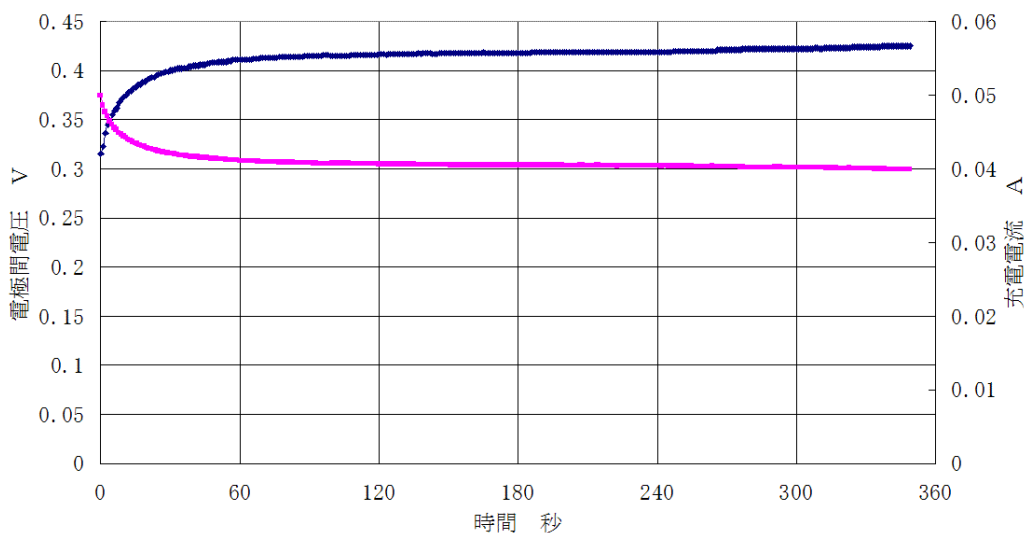
となった。

(3)コンデンサ3号機

市販の円筒形の電気二重層コンデンサは電極を螺旋状に巻き取った構造であった。そこで同じような構造にすれば電極の面積も増えるので容量の大きなコンデンサが出来るはずである。そこで電極として厚手のアルミ箔に活性炭を接着剤で貼り付けて、キッチンペーパーに食塩水をしみこませる構造に挑戦した。



コンデンサ3号機

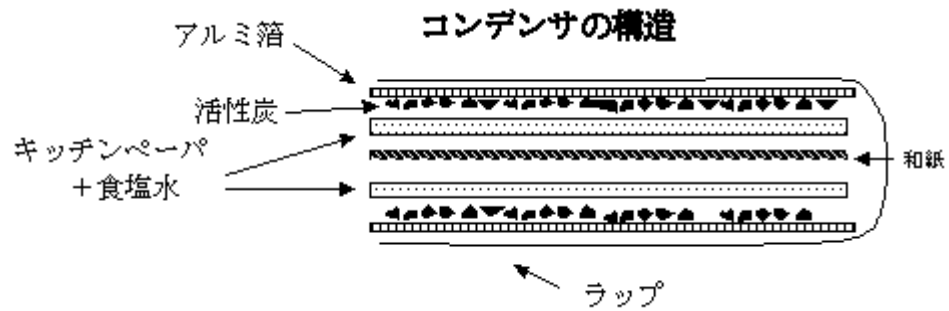


コンデンサ3号機を充電したときの充電電流と電極間電圧の時間変化のグラフである。残念ながら電極間の絶縁が保たれていない。活性炭はかなりゴツゴツしているもので、突起部分がキッチンペーパーを突き抜けて導通してしまったと考えられる。

失敗である。

(4)コンデンサ 4号機

絶縁不良が生じたので 4号機はアルミの板に活性炭を貼り付ける方式に切り替え、極板間に食塩水でぬらしたキッチンペーパーの間に和紙を挟んだ。

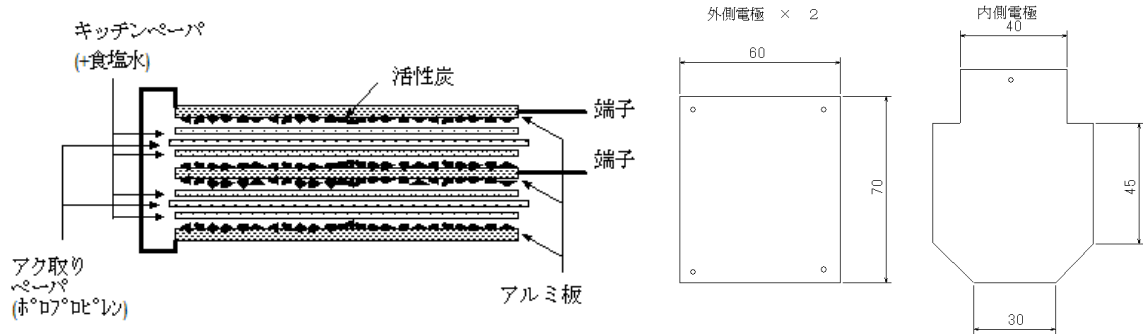


測定の結果、充電電流が全く流れなかった。和紙が乾いていたので導電性が得られなかったと考えられる。

失敗

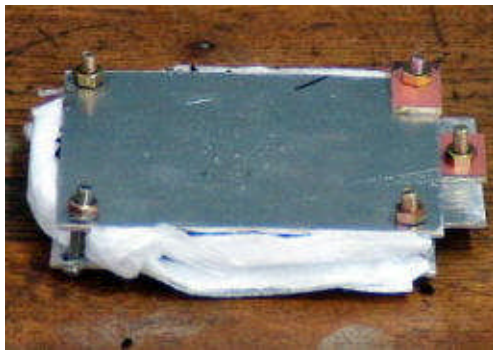
(5)コンデンサ5号機

4号機, 3号機の反省をふまえてコンデンサ5号機を試作した。

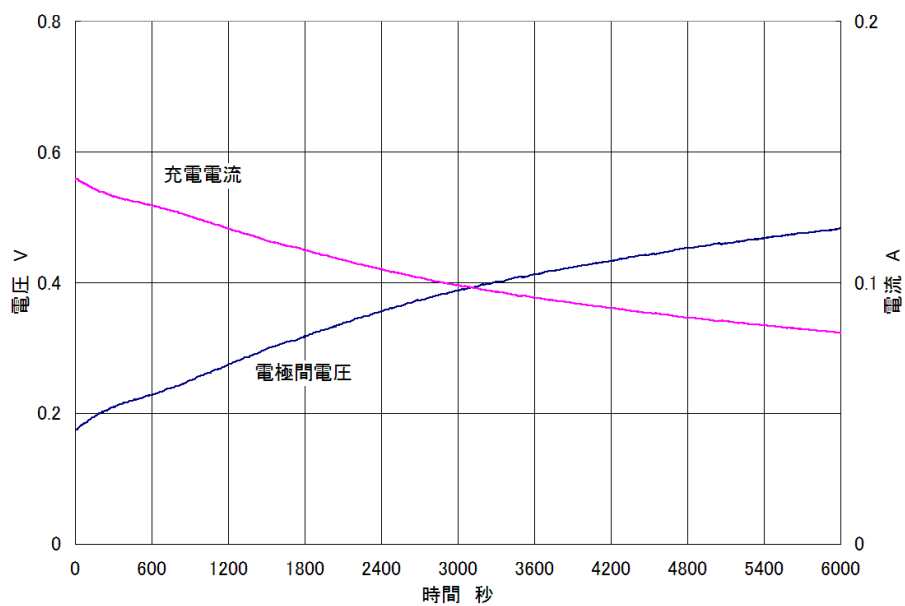


図のような構造で3枚のアルミ板を使い, キッチンペーパーに食塩水をしみこませて絶縁を意識して間にアク取りペーパー(ポリプロピレン製)を挟んだ。アルミに活性炭は接着剤で固定した。

食塩水をしみこませる前に組み立てて電極間の絶縁を確認し, 次にキッチンペーパーに食塩水の飽和溶液をしみこませた。さらに乾燥しないようにアクリルの箱に入れた。



コンデンサ5号機 充電 電圧・電流



0.9V の電圧で、3.3 の抵抗を直列に入れ、電流計の内部抵抗 1.5 との合計で約 5 の抵抗で約 100 分間充電したときの充電電流とコンデンサの電極間の電圧の変化を測定した。

充電する直前の電極間電圧 0.022V

充電直後の 電極間電圧 0.175V 充電電流 0.1394 A

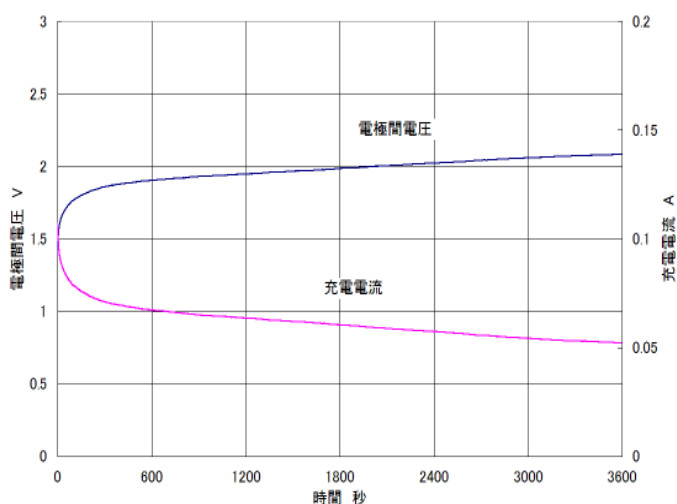
このことから内部抵抗 R は $R = (0.175 - 0.022) \div 0.1394 = 1.1$

Q/ V 容量計算方法で求めた容量 C は $C = 1996 \text{ F}$ となった。

大成功!

次にこのコンデンサ 5 号機を 3 個直列にして、2.7V の電圧で充電した。このとき、各コンデンサに、アクリルのケースを 2% の食塩水で満たした。

コンデンサ5号機3個直列



充電する直前の電極間電圧 -0.245 V

充電直後の 電極間電圧 1.378V

充電電流 0.1074 A

このことから内部抵抗 R は

$R = (1.378 + 0.245) \div 0.1074 = 15.1$

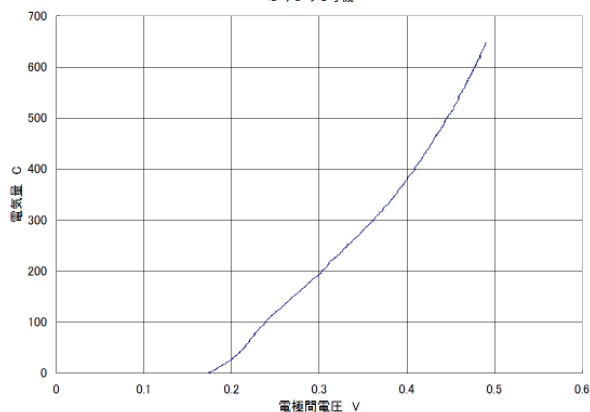
Q/ V 容量計算方法で求めた容量は

$C = 216 \text{ F}$ となった。

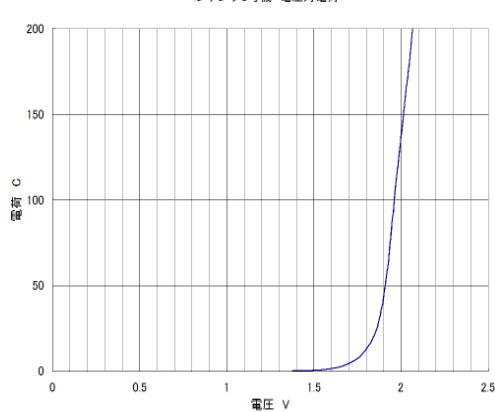
3 個直列では 600 F 程度の容量が期待されたが、かなり小さい。

少し変だ!

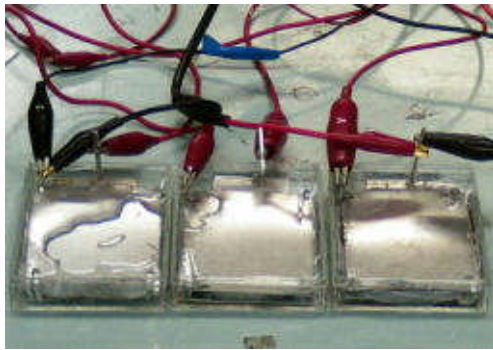
コンデンサ5号機



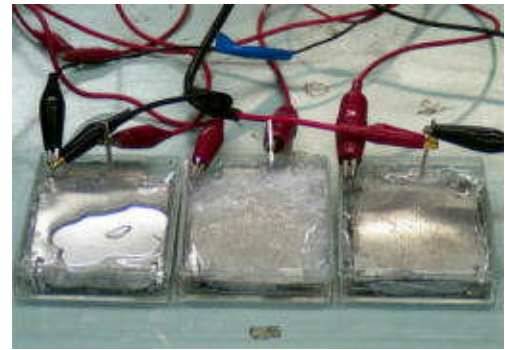
コンデンサ5号機 電圧対電荷



コンデンサにたまった電気量と電極間電圧のグラフを見ると(左: 1 個, 右 3 個直列)本来直線になるはずだが、3 個直列の場合 2 次曲線のようにになっている。このグラフを見ても 3 個直列にした場合はコンデンサとしてうまく働いていないことがわかる。



充電初期の様子



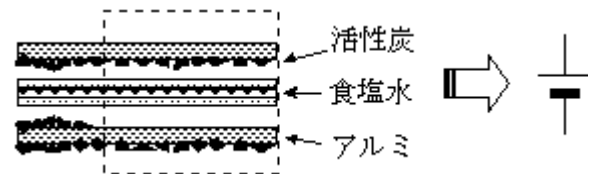
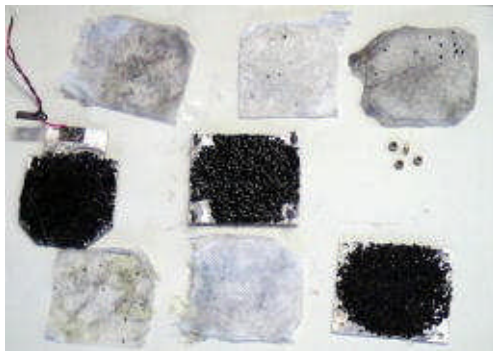
充電後期の様子

この写真は充電初期と後期のコンデンサの写真である。充電後期になると電極から盛んに気泡が発生し初めた。気泡が激しく発生しているコンデンサの電極間の電圧を測定すると0.7V程度で、水が電気分解する電圧ではない。しかし、気泡にろうソクの炎を近づけると「パン」と音を立てて消滅した。明らかに水素が発生していた。

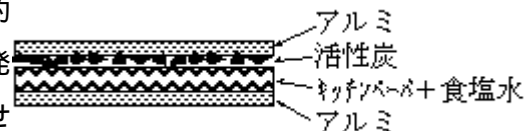
2. コンデンサ自作での反省と考察

電圧が0.9V以下ならば電気分解は生じないと考えていたが、おきている。コンデンサ5号機一つで実験したときとの違いを比較すると「アクリルのケースを2%の食塩水で満たした」の違いである。また食塩水で満たされた結果ビニール線をハンダ付けするために用意したプリント基板で作った端子の銅箔も腐食している。

(1)電池になっている。



この写真は使用後のコンデンサ5号機を分解した写真である。よく考えると、露出したアルミニウムと活性炭が図のように組み合わせられると電池になるはずである。そこで実際に電池になるか確認したところ電圧0.68V、短絡電流0.4Aが流れた。なお電極の面積は約40cm²である。このように局部的に電池が発生してコンデンサ内部で電流が流れて予期せぬ現象が生じたと考えられる



このことから、集電電極（アルミ板）と活性炭は電氣的に接触させることが必要であると同時に、集電電極は電解液（食塩水）に接触させてはいけないことがわかる。

集電電極は電解質と接触させない

3. 備長炭型コンデンサの自作

予備実験の結果をふまえて実用になると確信してコンデンサを自作したが、予備実験ではうまく洗い出せなかった事がいくつも見付き、充電して発光ダイオードを光らせることもできなかった。その中でもっとも厄介な問題は構造上の問題である。

活性炭電極の場合、集電電極(アルミ)と活性炭の接着をどのようにするかが解決しなければならない最大の問題点である。

また、本当に電気二重層コンデンサが自作できるのかとの不安もつよくなった。そこで予備実験で試した備長炭をじかに電極にして食塩水に浸す単純な構造のコンデンサを作り発光ダイオードを点灯させることができるか確認することにした。

(1)小型備長炭電極コンデンサの製作

備長炭電極のコンデンサを3個製作した。炭素電極の場合水の電気分解は1.3 Vなので3個直列で耐圧が3.9 V程度となる。備長炭電極(長さ4cm × 直径3cm)への電線の接続はステンレスのねじで行った。密閉容器のふたの上からねじを通して備長炭をねじで固定してあるので、食塩水が電線接続用の端子にかかるとはならないはずだ。



(2)小型備長炭電極コンデンサの特性

2%の食塩水に電極を浸して、特性を測定した。

充電する直前の電極間電圧 0.027V

充電直後の 電極間電圧 0.441V

充電電流 0.0752 A

このことから内部抵抗 R は $R = (0.441 - 0.027) \div 0.0752 = 5.5$

また、放電時の電圧変化から内部抵抗を計算しても5.2 となる。

Q/ V 容量計算方法で求めた容量 C は $C = 21.4 \text{ F}$ となった。

(3)食塩水の濃度

予備実験で最適な値は2%を得たが、10秒間の一定充電時間でその後の電圧の変化をテストで測定した。かなり粗い実験で得られた結果に合理的な理由が見いだせない。そこで小型備長炭電極コンデンサで飽和食塩水に電極を浸して、特性を測定した。

充電する直前の電極間電圧 0.13V

充電直後の 電極間電圧 0.258V 充電電流 0.0948 A

このことから内部抵抗 R は $R = (0.258 - 0.130) \div 0.0948 = 1.35$

また、放電時の電圧変化から内部抵抗を計算しても1.39 となる。

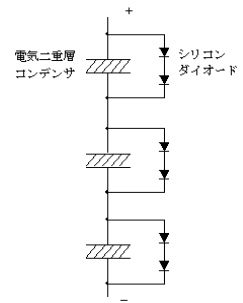
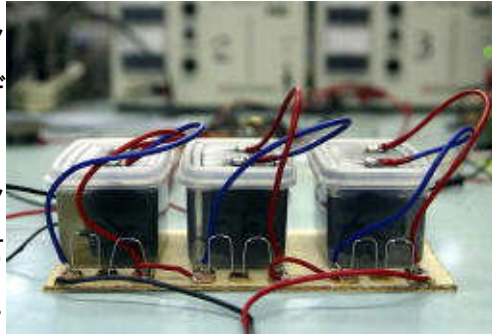
Q/ V 容量計算方法で求めた容量 C は $C = 26.3 \text{ F}$ となった。

この結果から、食塩水の濃度を濃くすると、コンデンサの容量は若干増加する程度だが内部抵抗はかなり小さくなる事が分かる。

食塩水を濃くすると内部抵抗が小さくなる

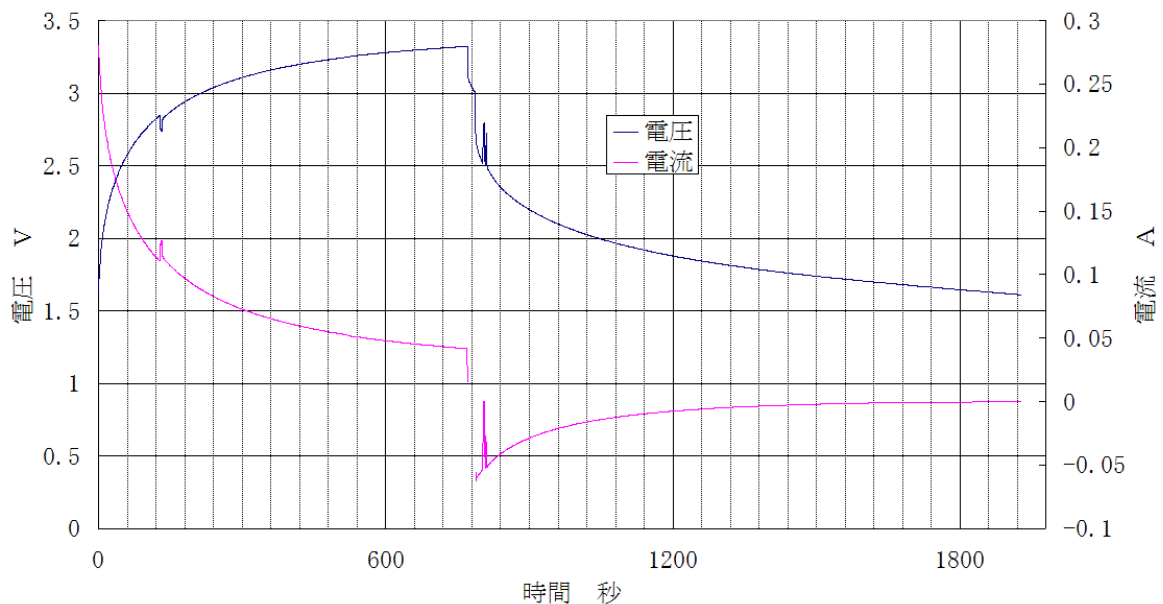
(4)小型備長炭電極コンデンサ3個直列

小型備長炭電極コンデンサを3個直列にしたコンデンサモジュールを組んだ。各コンデンサにはシリコンダイオード2個直列にして図のように並列に接続した。



シリコンダイオードの順方向電圧は約 0.6 V なので、一個のコンデンサに 1.2 V 以上の電圧がかかるとダイオードに電流が流れ、これ以上電圧は上がらないので電気分解は起こらない。このモジュールを 3.6 V の電圧で 5 Ω の抵抗を直列にいれて充電した。

小型備長炭 3 個直列



このグラフは充電・放電特性を記録した。約 1 3 分充電した後、電源装置を取り外し赤色 LED をつけて放電した。

3 個直列でのコンデンサの容量は 14 F
内部抵抗は 5.1

と計算できた。若干容量が大きめに見積もられているが、他の 2 個のコンデンサの容量が若干大きい可能性がある。なお内部抵抗はほぼ 3 倍になっている。そして LED は約 20 分間点灯した。



やっと目標のコンデンサが完成した！

コンデンサの充放電

1. コンデンサに蓄えられるエネルギー

静電容量 C [F] のコンデンサを電圧 V [V] の電池につぎ、 Q [C] の電荷が流れて充電された場合を考える。

コンデンサに蓄えられたエネルギー U_c は

$$U_c = \frac{1}{2} QV = \frac{Q^2}{2C}$$

電池がした仕事 U_b は

$$U_b = QV$$

電池のした仕事の半分しかコンデンサに貯まらない。残りのエネルギーは抵抗で消費されることになる。

通常の電源は電流が変化しても常に一定電圧を維持する定電圧電源である。電池も内部抵抗が小さいので定電圧電源と同じと考えることも場合によっては可能である。このような電源でコンデンサを充電する場合、電源が供給する 50% のエネルギーしかコンデンサにためることができない。ところで文献 2, P316 に効率を充電時間でコントロールできるとあるので、自作のコンデンサに当てはめて考察してみる。以下の式は文献 2 をもとにまとめた。

ここで一定の電流で充電する場合を考える。定電流電源での充電である。負荷抵抗にかかわらず常に一定電流 I [A] を流す電源で t [S] 間の充電を考える。

$$U_c = \frac{Q^2}{2C}, \text{ ここで } Q=It \text{ を代入し } U_c = \frac{I^2}{2C} t^2$$

抵抗で消費されるエネルギー U_R は

$$U_R = I^2 R t$$

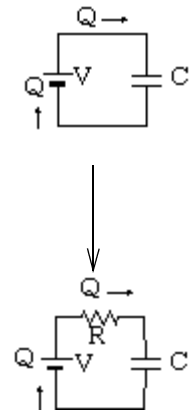
電源が供給したエネルギーは $U_c + U_R$ であるから、電源装置が発生したエネルギーのどれだけがコンデンサに蓄えられたかを示す充電効率 ϵ は

$$\epsilon = \frac{U_c}{U_c + U_R} = \frac{\frac{I^2}{2C} t^2}{\frac{I^2}{2C} t^2 + R I^2 t} = \frac{t}{t + 2RC} = \frac{1}{1 + \frac{2RC}{t}}$$

ここで RC とは (電気二重層コンデンサの内部抵抗 + 電源の内部抵抗) と容量の積で、時定数を示す。従ってコンデンサの内部抵抗による損失は充電時間 t を長くすることで小さくすることが可能である。文献 2 より

ここで小型備長炭電極コンデンサ 3 個直列の場合で考える。(電源の内部抵抗は無視)
 $R = 5.1$, $C = 14$ F であるので、 $RC = 71.4$ 秒 である。 $\epsilon = 90\%$ になる充電時間を見積もると $t = 1428$ 秒 になる。この時間を T とおく。

それではどれだけの電流値 I で充電するかを考察する。 T の間に流れる電荷 Q は



$$Q=IT$$

コンデンサには耐圧 V_{max} があるので $Q[C]$ 流れ込んだときに V_{max} になるように電流値を I を決めればよい。従って

$$IT = CV_{max} \text{ より } I = \frac{CV_{max}}{T}$$

ここで $V_{max} = 3.6 \text{ V}$, $C = 14\text{F}$, $T = 1428 \text{ 秒}$ を代入すると

$$I = 36\text{mA}$$

このように、定電流電源で 36mA の電流値で約 25 分間の時間をかけて充電することで充電時の効率率は 90% になる。

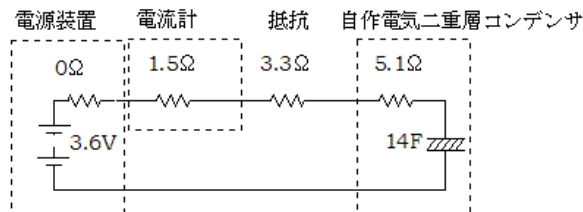
そして定電流電源装置の効率が十分に高いことが必要になる。従ってスイッチング型の定電流電源装置が必要になる。

2. 定電流電源装置による充電効率の向上

(1) コンデンサ充電時のエネルギー効率の計算

自作のコンデンサ（小型備長炭電極コンデンサ 3 個直列）の特性を測定したときのデータを元にエネルギーの流れをおって理論どおりかを確認することにした。

充電時の機器の接続関係は下の回路図のようになっている。



まず電源装置は起電力 3.6V で内部抵抗ゼロとして、この端子から供給されたエネルギーがどこでどれだけ消費・充電されたかを計算した。

充電は 771 秒間行われたがそのときのエネルギーの関係は

電源装置が供給したエネルギー	176.6J	100%
電流計，抵抗(1.5 + 3.3)での消費電力量	29.7J	17%
電気二重層コンデンサの内部抵抗での消費電力量	31.6J	18%
コンデンサに蓄えられたエネルギー		
771 秒後の充電後のコンデンサの電圧	3.096V	
間に流れ込んだ電気量	60.8C	
1/2QV で計算したエネルギー	94.1J	53%

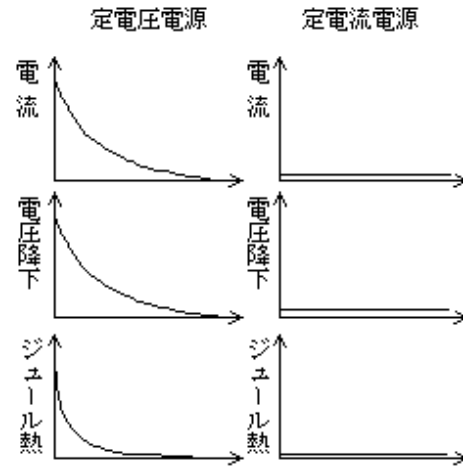
この計算結果から

$$0.5 \times$$

このように電源装置が出力した 50% のエネルギーがコンデンサにたまり、他はジュール熱で消費されることが充電時の記録から確認することができる。

(2)定電流源での充電での効率

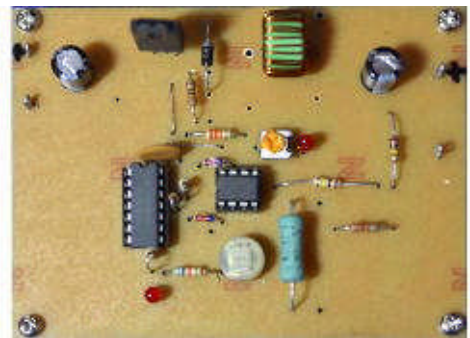
どのような値の負荷抵抗がつながっても，一定の電流を流す電源装置が定電流電源である。コンデンサを充電する場合必ずコンデンサには内部抵抗が存在するのでジュール熱が発生する。定電圧電源で充電する場合，充電初期にコンデンサの電圧がゼロなので，内部抵抗の両端に大きな電圧が加わり，大きな電流が流れ，ジュール熱が発生する。



定電流電源で充電すると，常に一定の電流が流れるように制御され，内部抵抗で発生する電圧降下も一定となる。たとえば電流を 1/10 にすると電圧も 1/10，従って抵抗で発生するジュール熱は 1/100 倍になる。電流を 1/10 倍にしたのだから，充電時間を 10 倍にすれば満充電になる。そしてジュール熱は $1/100 \times 10$ で 1/10 倍になる。つまり少ない一定電流で長時間充電すると内部抵抗による電力損失を低減することができる。

定電流電源装置の設計は顧問の先生にお願いした。

理論的に電源装置が出力したエネルギーの 50% しかコンデンサにたまらない。しかし定電流電源装置を挿入することでエネルギーのロス回避できるが装置の効率が良くないと実質的な充電効率は向上しない。そこで実際に効率を市販のコンデンサを利用し測定することにした。



右の測定回路で 内部抵抗 $R = 4.7$
静電容量 $C = 10F$

のコンデンサを約 60mA で 19 分充電した。

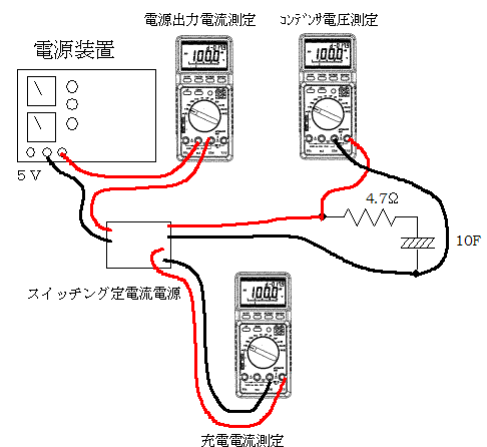
電源装置が供給したエネルギー	152.2J
抵抗(4.7)での消費電力量	14.26J
コンデンサに蓄えられたエネルギー	93.27J
1116 秒後の充電後のコンデンサの電圧	3.618V
" 間に流れ込んだ電気量	51.56C
1/2QV で計算したエネルギー	93.27J

このときの効率は 61.3% となった。なおスイッチング定電流源の平均効率は 75.9% であった。

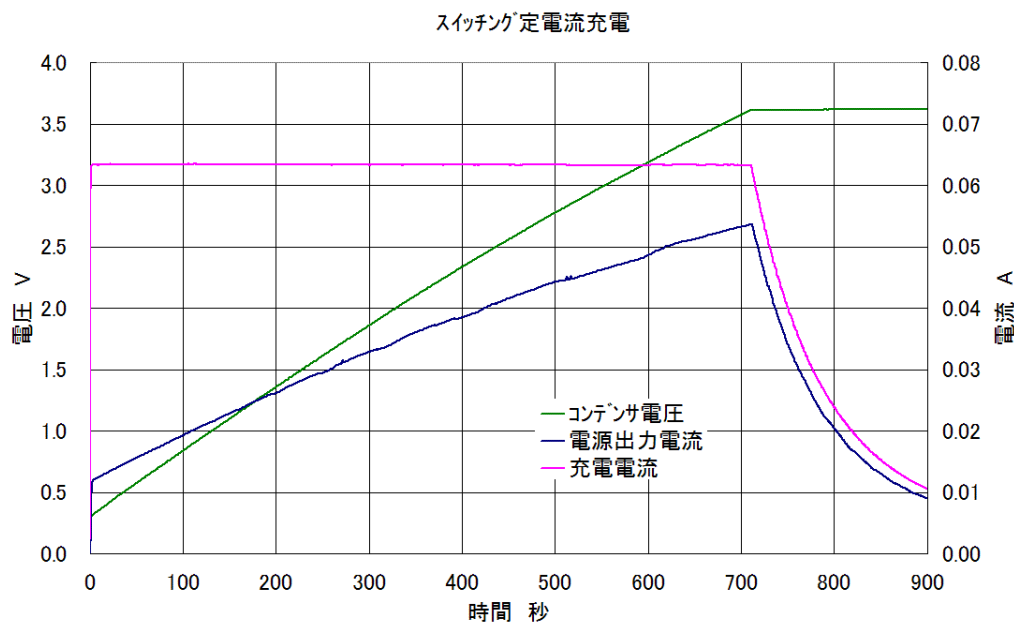
× 75.9%

+

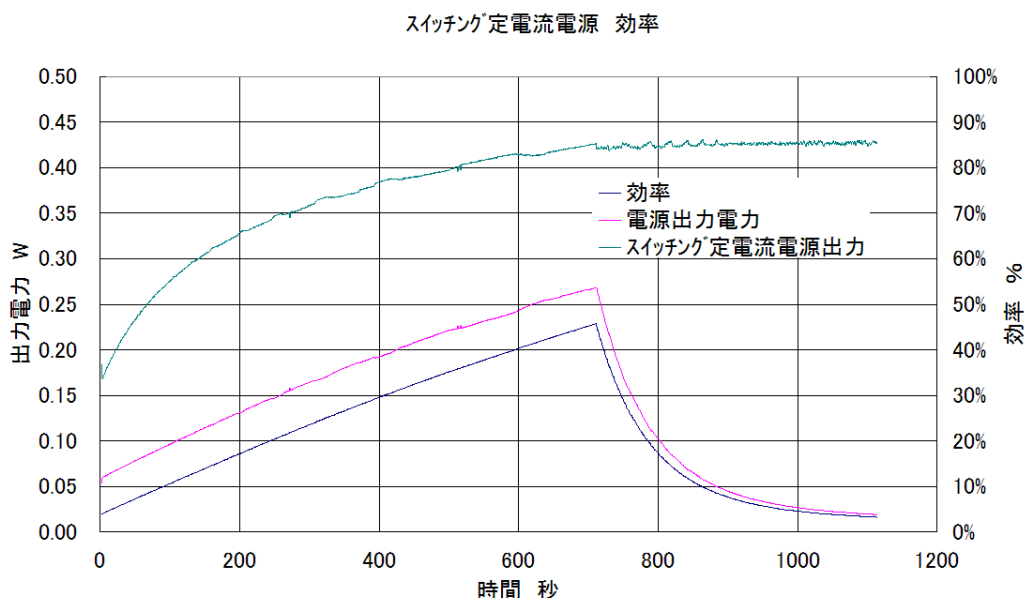
充電効率 61.3% で 50% を超えた！



充電中の充電電流，5 V一定の電圧を発生している電源装置から流れ出る電流，コンデンサの電圧を 900 秒間記録したグラフである。



定電流電源として立派に動作している。また一定電流が流れているのでコンデンサの電圧も時間に比例して上昇していることがわかる。



定電流電源装置の効率をグラフにした。電源装置の出力電力で，定電流電源の出力電力を割り算して求めた。

定電流電源として動作している領域では，電源出力電力とスイッチング定電流電源出力の間には一定の差が生じていることがわかる（装置の損失）。したがって，出力電力が小さい領域では効率が悪化することになる。

研究のまとめ

1. 自作小型備長炭電極コンデンサの性能と可能性

自作の可能性をいろいろなタイプの構造の電気二重層コンデンサを試作して探った。現時点で安値で簡単に自作できる構造のコンデンサは飽和食塩水に備長炭を浸す構造で、この写真の様に3個直列にして得られた電気的性能は（電極の大きさ4cm×直径3cm）

容量	14 F
耐圧	3.6 V
内部抵抗	5.1



となった。

電源装置で直接充電する場合の充電時間は、 V_0 を電源装置の電圧 = 3.6V、 R を内部抵抗=5.1、 C を容量 = 14 Fとすると、 t 秒後のコンデンサの電圧 V は次式で示される。

$$V = V_0(1 - \exp(-\frac{t}{RC}))$$

$t = RC$ 、代入すると $t = 71.4$ 秒充電すると、63.2%の電圧まで充電できる。

しかしエネルギー U は

$$U = \frac{1}{2} C V^2$$

で計算するのだから、エネルギーは 39.9%しかたまっていない。満充電の 90%のエネルギーまで充電するには $t = 3 RC$ 、つまり 214 秒(4分)の時間がかかる。

実用充電時間 214 分

満充電でコンデンサに蓄えられるエネルギー U_{max} は

$$U_{max} = 90J \text{ となる。}$$

実際の充放電で LED の点灯時間を見積もると、実験で 3.0V まで充電したコンデンサに LEDをつないだ。1140 秒(19分)間 LEDを点灯させることができた。この間に放出したエネルギーは 23.2 J、1140 秒後の電圧は 1.61V まで下がってほぼ消灯した。まだ3割のエネルギーが残っている。

この LED を 8 時間(28800 秒)点灯させるには、単純に 25 倍のエネルギーが必要であると考えれば、350F 程度のコンデンサを作ればよいことが予想できる。電極の面積を 25 倍にすればよい。長さ 15cm × 直径 3cm の備長炭を 8 本 × 2 のコンデンサを 3 セット作ればよい。

自作可能だ！

備長炭電極のコンデンサは内部抵抗が市販品に比べて大きく充電時間がかかり、大電流での放電もできない。しかし、太陽電池で日中充電し、日が暮れてから発光ダイオードの常夜灯を点灯させる用途には自作電気二重層コンデンサも十分利用可能であり、しかもメンテナンスが不要で誰でも作ることができる。エネルギーの有効活用のお手本のようなシステムになると思う。

2.まとめ

コンデンサには内部抵抗があるので、90%のエネルギーを充電するのにこの内部抵抗 R とコンデンサの容量 C の積の3倍、つまり $3RC$ の時間がかかる。

とるるで、自作コンデンサの容量は備長炭電極を大きくすれば大きくなる。予備実験で使った備長炭の容量は約 60 F、3個直列にして利用したコンデンサは一個約 30 F である。容量はほぼ大きさに比例している。また内部抵抗は 0.7 対 1.4 で、容量×内部抵抗を計算すると一定になると予想できる。(容量は表面積に比例、内部抵抗は表面積に反比例) 文献2 P317にあるように、 F (オームファラッド) はコンデンサの内部抵抗を正規化した表現法と提案しているが、今回の研究でも容量×内部抵抗の値は性能を示す指標である事が確認できた。

備長炭を電極にしてタッピングで電線を引き出し、食塩水を電解液にした場合、おおよそ容量×内部抵抗の値は $42F \cdot$ となる。この値は充電時間の指標になり、定電圧電源装置でじかに充電する場合次のことが言える。

備長炭を電極にしたタイプのコンデンサの充電時間は、計算上どのような容量でも、90%充電で約2分間の時間がかかる。(40F ~ 70F のばらつきがあり、2~4分かかる)

充電初期から満充電までの間に電池の電圧はあまり変化しないから。充電効率の考え方はニッカド電池の充電ではあまり考えていない。電源 - 電池間を抵抗でつなぐがけでも充電電流の変化は小さい。しかし、コンデンサは 0 V ~ 耐圧まで電圧が変化し電流が大きく変化する。内部抵抗での損失は無視できない。理論的には半分はむだになる。そこで、スイッチング型の定電流回路を挿入し充電電流を小さくし、長時間かけて充電すると理論的に効率を 100%近くに高めることができる。しかし、今回試作したコンデンサのように内部抵抗が大きく、微小電流で充電する場合、小電力領域で装置の効率を高くできない(一定電力の損失がある)ので 50%以上にすることはかなり難しい。それどころか装置の電力の分だけむだになるため 50%を下回る可能性も高い。我々が自作したコンデンサの性能ではこの装置での効率向上は難しい。

コンデンサは放電すると電圧が下がる。また、1個のコンデンサの耐圧も 1V 程度で低く複数個直列にして、さらにスイッチング型の定電圧電源装置を間に入れないと電池のように一定の電圧を維持できない。また十分にエネルギーをコンデンサから引き出せない。しかし、数 10 F 程度の容量のコンデンサでは装置を動作させるための電力をまかなうとかえって利用できるエネルギーが少なくなる可能性がある。

科学技術で製作したLEDランプ用の昇圧回路は 0.9V の電圧で動作し 3.6V に電圧を上げる。効率がおおよそ 50%である。コンデンサの 94%のエネルギーを使い切れるが、効率が 50%なので 47%エネルギーしか利用できないことになる。

今回の小容量のコンデンサの場合、電子回路を使ってコンデンサに電力を貯蔵して利用する場合、電子回路を動作させるための電力が無視できず、効率を向上させるのは大変むずかしい。

文献2 P320 に電解液に導体を浸すと必ず界面に電気二重層が発生するので、集電電極や引き出し線を絶縁する必要はないと述べられているが、今回の研究では局部電池の発生や腐食の問題があるので、集電電極は電解液(食塩水)から絶縁する必要がある。

今回の研究で2つのタイプのコンデンサを自作した。

活性炭を電極にアルミを集電電極にしたタイプ

備長炭に電線をタッピングで接続したタイプ

この2つのタイプのうち に関しては活性炭と集電電極の電氣的接続がうまくいかないなどの多くの問題があり今回は実用にはならなかった。今後継続して研究を進める。

のタイプのコンデンサは と比較して単純で十分実用になった。しかし約一ヶ月製作したコンデンサを放置したところ写真の様に液が濁り、さらに故障した。

- ・黄土色に液が濁る原因は、備長炭に含まれていた鉄分が原因のようである。
- ・コンデンサとして故障した原因は液の濁りではなく陽極側の備長炭との電線の接触が劣化したことによる。

液が濁ったまま、再度電極と電線の接触を復活させると元通りの性能に復活した。

これらのことから、備長炭電極のコンデンサにおいて、電線との電氣的接続方法を改善する必要がある。

備長炭電極 4本×4本 タイプ

研究の結果で得られた事柄を検証する目的で各電極に備長炭を4本使った大型のコンデンサを製作した。

コンデンサが故障した原因をふまえて電線部分に接着剤を塗り、さらに食塩水の量を減らして濡れないように注意した。

備長炭の上部に 3.5 25mm のステンレス製タッピングで電極をねじ止めしたが、備長炭を縦に割ってしまう失敗を繰り返した。そこで写真の構造に途中から変更した。



故障したコンデンサ



4本×4本電極



製作途中の備長炭電極



電線の引き出し

炭素粉が食塩水に混ざると漏れ電流が増加する可能性があると考えられるので、はじめに備長炭を超音波洗浄機で洗浄した。洗浄することで炭素粉がとれるので食塩水が黒く濁らなくなる。

製作したコンデンサの特性を測定した。予備実験 4 で利用した電極の 4 倍の電極を使っている。従って 200F 程度の容量は期待できると予想した。

食塩水の濃度	容量	内部抵抗	測定時外付抵抗値	容量×内部抵抗
飽和していない	100F	0.54	3.3	54F·
飽和食塩水	117F	0.40	3.3	47F·
〃	155F	0.3	4.8	47F·
〃	188F	0.3	11.5	56F·

測定結果がこの表である。このことから

- ・食塩水の濃度は濃い方がよく、内部抵抗も小さくなる。
- ・少ない電流で容量を測定するほど容量は大きく測定される。
- ・容量×内部抵抗の値は一定になる。

ことが再度確認できた。また測定後の電解液の様子を観察すると陽極と陰極間に短絡防止の目的で水槽用のフィルタで仕切った結果写真のように、陽極から黄土色の濁りが発生することがはっきりした。またこの濁りは性能には影響が無かった。(時間がたつと陰極も濁る)



陽極に発生する濁り

内部抵抗が 0.3 , 188F のコンデンサとなった。抵抗を介さずに直接定電圧電源装置に接続

すると、電源装置の電流計の読みで、充電開始直後は 3A 程度の電流が流れるのが確認できる。市販のコンデンサの振る舞いに近い感じがした。

容量×内部抵抗が一定であることから、

- ・容量の大きなコンデンサを作ることと内部抵抗を下げることは同じである。

容量が大きくなると内部抵抗は小さくなる。したがって、大容量のコンデンサを作れば内部抵抗も同時に下がる。内部抵抗が下がれば、

- ・充電初期の過大電流による電源装置の保護を行うために必ず抵抗を挿入する必要がある。

そこで抵抗の代わりにスイッチング定電流電源を利用すれば、電源の保護と同時に充電効率向上の役目も果たすことが出来る。

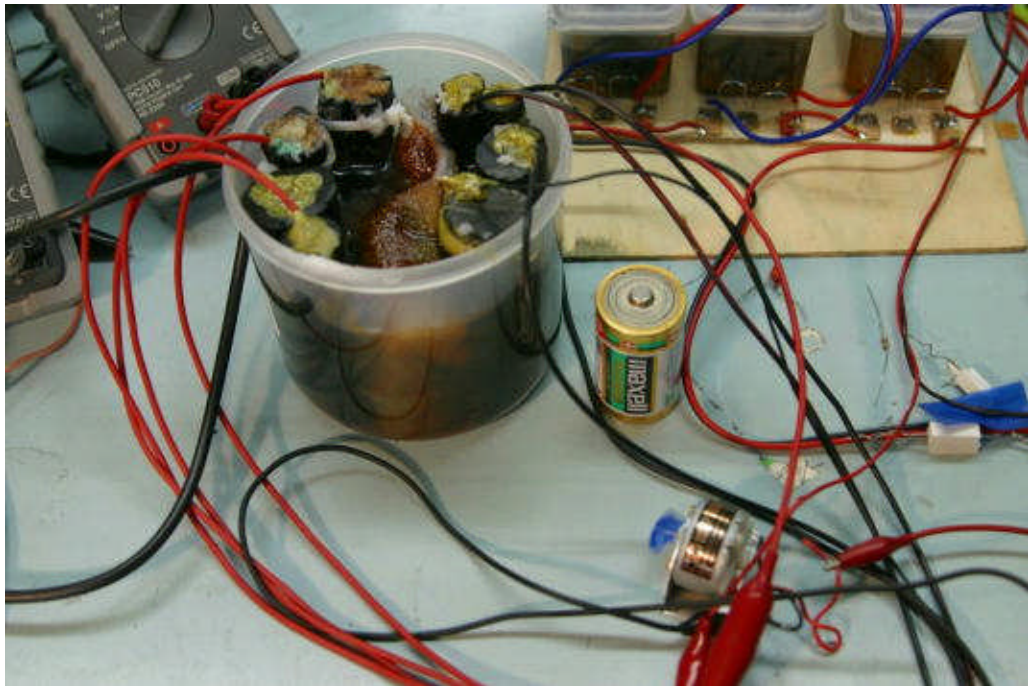
内部抵抗の高いコンデンサを電源とすると、電流を流すと電圧がすぐに下がってしまう。大きな電力を供給できない。しかし内部抵抗が下がればこの問題も回避できる。

・備長炭電極のコンデンサの内部抵抗×容量 50F· より 350F のコンデンサの内部抵抗を見積もると 0.14 と予測できる。このように

- ・コンデンサの内部抵抗を予測できる。

備長炭電極 4本×4本 タイプの性能

コンデンサの容量が測定時の定数で変化するので、やはり実際に負荷をつないで市販のコンデンサと比較することで推定することにした。

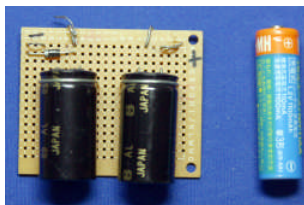


自作備長炭電極電気二重層コンデンサ

太陽電池用の小電力モータをどれだけ回し続けることができるか、市販の20 F のコンデンサ (10F × 2) と比較した。

	自作コンデンサ	市販20 F コンデンサ
回転持続時間	5時間(18,000秒)	20分(1,200秒)
出力した電力量	228 J	20 J

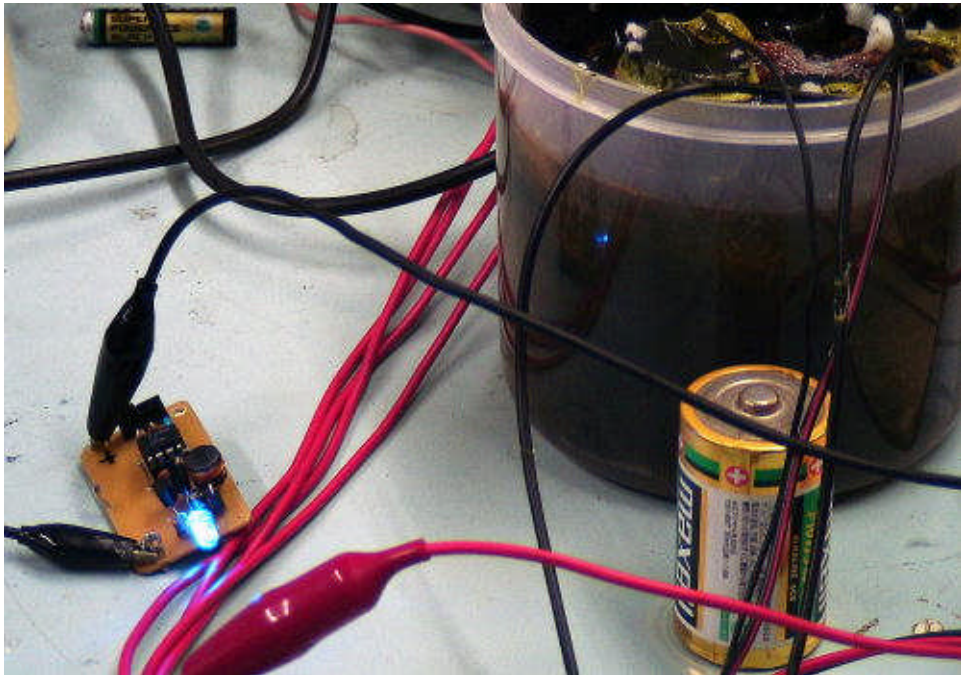
20F のコンデンサと比較して回転持続時間で 15倍 エネルギーで 11倍 であった。自作コンデンサの容量は188 Fである。1時間程度十分時間をかけて充電した。1/2CV² で充電したエネルギーを計算すると135 Jであるから、実際には188 F より容量は大きくて、エネルギーで逆算すると228 Jのエネルギーを出力するには260 Fと見積もることができる。



10 F × 2

公称 10F であるが、予備実験では11～15 F 程度に測定された。2個並列で 30F 程度ある可能性は高い。

ニッカド電池の容量表示法で自作コンデンサを表すと $228\text{J} = 1.2\text{V} \times 3600 \times A$ より $A = 53\text{mAh}$ となる。写真のニッカド電池は1100mAh



青色発光ダイオード点灯実験

自作の昇圧回路の電源にコンデンサを利用して何分間LEDが点灯するか比較した。昇圧回路は 1.2V 程度で動作を開始し、電源電圧が 0.5 Vまで動作を続ける。3.5V 程度に昇圧するのでLEDを点灯させることが出来る回路である。

20F市販コンデンサ	7.8分
自作コンデンサ(3分充電)	25分
自作コンデンサ(長時間充電)	114分

理論的に3RCで90%のエネルギーが充電できるはずだが、3分間の充電では25%程度しか充電できていないことになる。

実際の内部抵抗、および容量は計測した値より大きいと推定できる。

もちろん太陽電池などでゆっくり充電する場合にはこの充電時間は問題にならないと考えられる。

備長炭電極 4本×4本 タイプ自作する上でのポイント

集電電極の取り付け

集電電極として、備長炭にスズメッキ線を数回巻き付ける。巻始めと終わり数 cm を残し電線をハンダ付けする端子とする。なお切断面にタッピングで電線を取り付ける構造では、炭中心から放射状に広がるスジ（放射状組織）の隙間が食塩水を毛管現象で吸い上げ、後に乾燥し食塩が析出する現象が生じ、電極を腐食させる。

耐久性

完成後、数日たつと水が黄土色に濁る。しかし性能には影響がない。

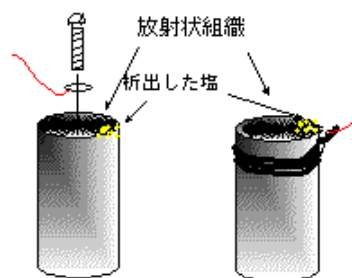


銅線が腐食した。後に断線した。

塩が析出している

ハチマキ状にスズメッキ線を表面に巻いた集電電極はさびづらい。しかし断面にタッピングで固定し電線を引き出した構造では、合成樹脂で保護しても、下からしみ出す食塩水に触れることになり腐食する。

集電電極が腐食する 集電電極は腐食しづらい



備長炭電極 4本×4本 タイプの容量の変化

塩が析出したり、電解液が濁るなどの現象から耐久性に不安があったが、特に大きな問題にはなっていない。それどころか、時間の経過とともに容量が増加することがわかった。この理由は、断面上部に食塩水が吸い上げられたことが示すように、放射状組織に塩水が徐々に浸透していくことに関係していると考えられる。モータ・LED の動作持続テストを行った後に、同じ条件で容量を測定した結果次の様に变化した。

容量	内部抵抗	測定時外付抵抗値	容量×内部抵抗
155F	0.3	4.8	47F・

容量	内部抵抗	測定時外付抵抗値	容量×内部抵抗
298F	0.12	4.8	36F・

測定と測定の間は4日間の時間があいている。モータの持続時間の測定の時に算出した260Fとほぼ容量に測定されている。このことから

自作備長炭電極電気2重層コンデンサは十分に塩水が電極内部に浸透すると本来の容量を示すようになる。 ことがわかる。

3. コスト対効果

安値で簡単に作る目標があったのでかかった経費をもとにコスト対効果を見積もる。

品目	単価	数量	小計
備長炭	25	3	75
ケース 3 個パック	105	1	105
ダイオード	20	6	120
合計			300

その他水道水と塩少々が必要である。

この金額で 14F, 3.6V のコンデンサとなり, 91J のエネルギーをため込めるので 1J あたりの金額は 3.3 円/J となる。単純計算で 350F のコンデンサの自作は約 1 万円かかる見積になる。ところで市販品は

容量	単価 円	円/J
2.3V, 10 F	300	11.3
2.3V, 56 F	700	4.7
2.7V, 300F	3,5280	16.1
2.7V, 1700F	6,0900	9.8

反省と今後の目標

活性炭を利用した電気二重層コンデンサの自作がうまくいかなかった。活性炭を集電電極にうまく電氣的に接触させることに失敗したこと, 集電電極が電解液に触れてしまったのが原因であった。

そこでシリコンシーラントを集電電極の上にのばして, 活性炭をその上から乗せて圧着して集電電極と接触させる構造のコンデンサを作成した。集電電極が電解液に触れないように注意した作り方である。



5cm × 8cm の面積で耐圧 1.2V, 容量 60F のコンデンサになったが, 内部抵抗が 4.4 であった。コンデンサの内部抵抗をいかに下げることが課題である。しかし, 同時に簡単に作るの目標から外れてしまうジレンマがある。

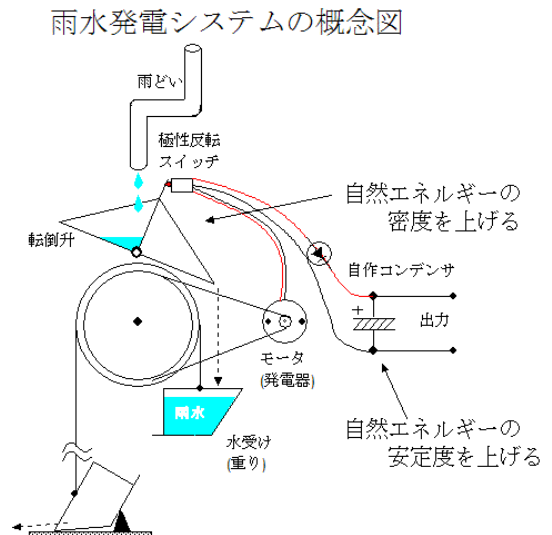
コンデンサ 5 号機は活性炭をアルミの板に圧着した構造のコンデンサで自作には成功していないが, 名刺大の大きさで約 2000F の容量になる可能性がある。集電電極への接着の仕方を工夫し内部抵抗を下げる研究をすることで市販品のコンデンサの性能に迫るものが自作できそうである。

このタイプのコンデンサの自作も課題の一つである。

コンデンサを何で充電するか十分な研究はできていない。太陽電池や, 以前先輩たち

が研究したペルチェ素子による熱発電素子など考えている。しかし最も注目している発電装置はモータである。直流モータは発電機になる。モータは一定電流を流すと一定トルクを発生する。逆に発電機として一定トルクをかけて回せば一定電流を流せるはずである。そこで、軸にひもで重りを下げて、重りを落下させ、コンデンサの電圧が上昇するのにあわせて回転数が上昇するように、等加速度で落下するような負荷がかかるように調整すればスイッチング定電流電源でコンデンサを充電することと同じ理屈でエネルギー効率が高いシステムになると予想できる。

雨どいから落下する雨水を容器にためて一定量に達したら重りとしてモータを回して発電し、コンデンサに電気をためるシステムを作れば、エネルギー密度の低い自然エネルギーを安定に取り出せる小型システムができるのではないかと考えている。しかしまだ空想の段階である。



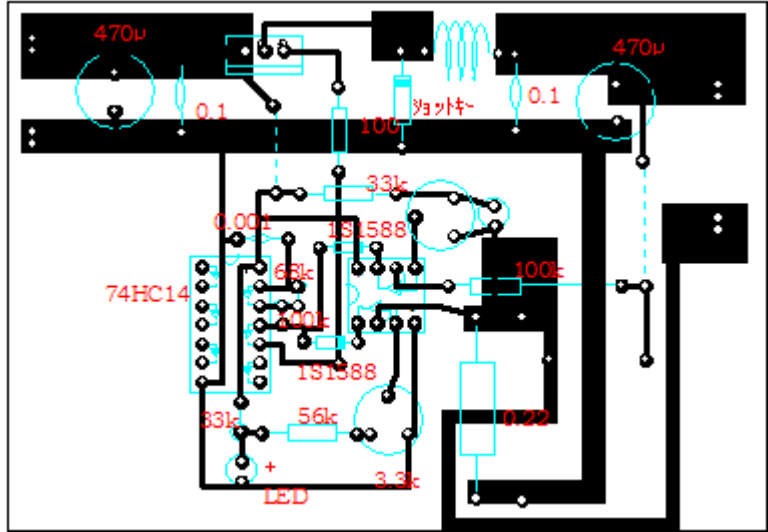
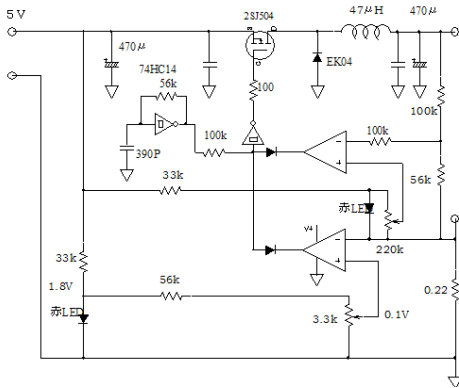
耐久性・漏れ電流について

集電電極の腐食による劣化の問題が長時間の試験運用の結果目立ってきた。ハチマキ状に錫メッキ線を巻いた構造はまだ不良の状態には陥っていないが、1mm のアルミ板を1cm 幅に切って備長炭に巻き付け、シリコンシーラントで固めたタイプは1週間程度でだめになった。ステンレスの針金などを集電電極にするなど再度検討する必要がある。

漏れ電流の大きさを見積もる目的で、一定電圧でコンデンサを充電して電流の変化を観察した。電流は徐々に少なくなっていくが、いつまでもたってもゼロにならない。一定電流になればその値が漏れ電流と考えられるが現時点では見積もることができていない。今後漏れ電流の測定方法を研究する必要がある。

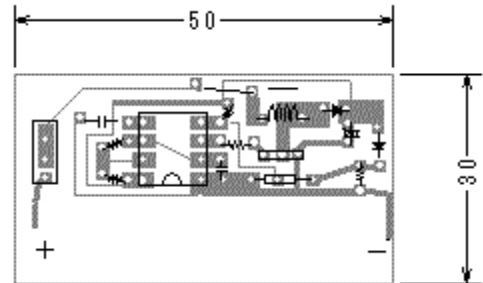
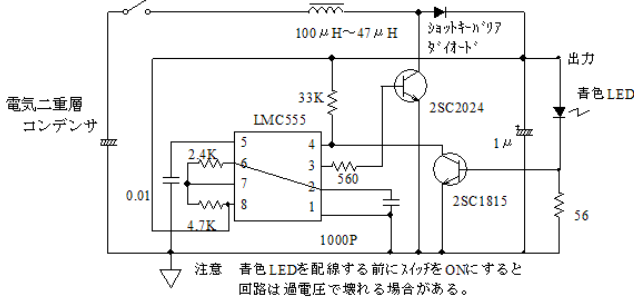
参考

1. スイッチング型定電流電源



充電効率の測定では、制御回路（オペアンプ + 発振回路）に流れる電流、約 4.5mA は別電源から供給し、効率の計算から除外した。制御回路に流れる電流は出力電力によらず一定で、今回の実験では大きく影響するがWオーダーの出力になれば無視できる値である。

2. LED 駆動回路



LED を使った懐中電灯の回路。無効電流がかなり流れ効率は50%程度しかなく、内部抵抗の大きな電気二重層コンデンサでは特に効率が悪い。

参考文献

- (1) 桑田和職：電気二重層コンデンサの基礎知識，トランジスタ技術 2001 年 4 月号，pp.257 ~ 258，CQ出版株
- (2) 岡村迪夫：短期連載 実験サイトで学ぶ新蓄電池からECS，トランジスタ技術 2001 年 2 月号，p.316，CQ出版株
- (3) 小林丈士：電気二重層コンデンサの基礎と応用事例，トランジスタ技術 2004 年 6 月号，pp.106 ~ 114，CQ出版株
- (2) ECaSS フォーラム <http://ecass25.rs.jp.net/jpn/admission/adlc.html> 筆者：岡村迪夫

コンデンサ耐久性の改善

電解液に食塩水をつかったことから、集電電極と引き出し線の腐食の問題があった。集電電極に1ミリのアルミ板を使った場合、シリコンシーラントで被ったにもかかわらず1週間程度でぼろぼろになった。スズメッキ線を集電電極にしてゴム系の接着剤で被った場合もいずれ腐食し始めた。さらに備長炭の断面に塩が析出した。

そこで腐食や塩の析出を防ぐために電解質（食塩水）の上を油（サラダ油）で被って集電電極、引き出し線が食塩水に触れることがないように処理した。

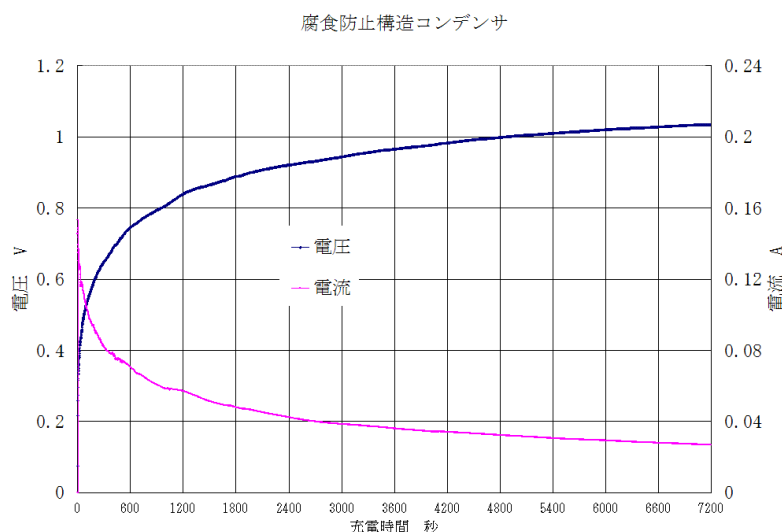
この写真が耐久性の向上を期待して試作したコンデンサである。備長炭を片側2本使ったタイプである。

電解質を注いで2日後に容量を測定した。電解質を注いでからの様子を観察したところ、一日後に備長炭電極の上部断面(サラダ油側)にたくさんの気泡の発生が見られた。まだ充放電をしていない段階なので、放射状組織の中の空気が追い出されてきたと考えられる。

二日後、食塩水に接してしまった集電電極に若干さびが発生したがその他の部分はほとんど変化はしていない。



2日後



測定の結果

容量：80 F

内部抵抗：0.67

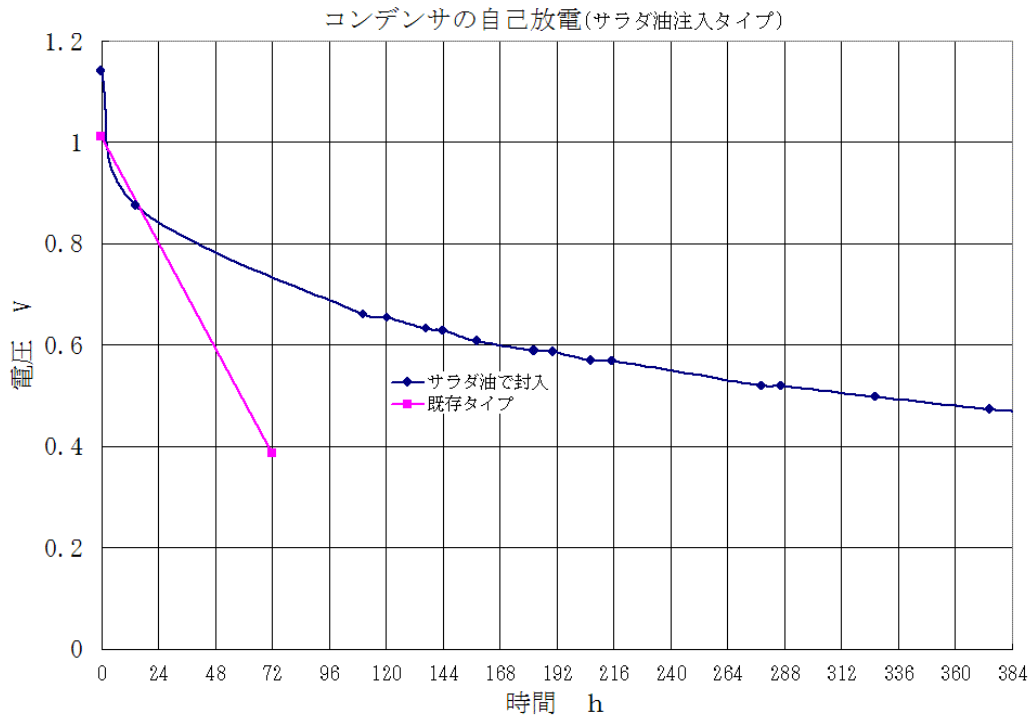
(54 F)

の性能であった。

食塩水でみたと5日後の電極、引き出し線の様子を観察しても、今までのような腐食や塩の析出の問題は生じていない。

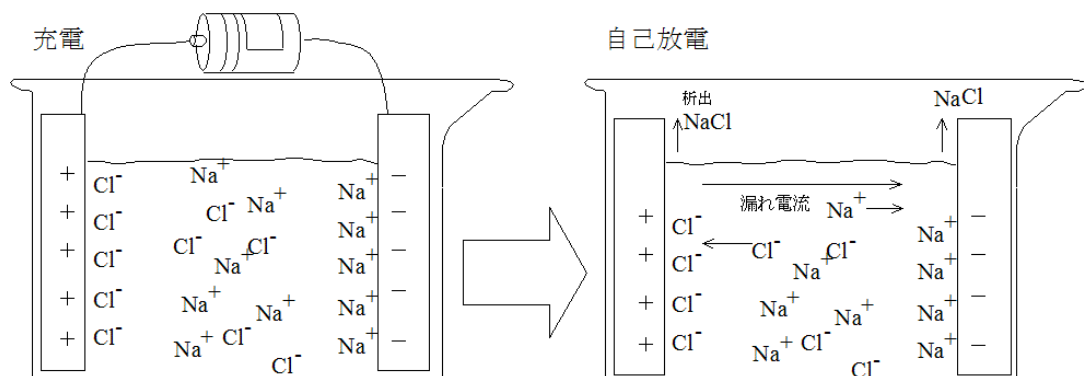
自己放電特性

サラダ油を注いだコンデンサは半月経過しても集電電極の腐食、および食塩の析出はない。少し食塩水が濁る程度である。さらに今までのコンデンサは充電後、3日経過すると 0.3 V 程度に放電し、この大きな自己放電が電極の腐食とともに問題であった。しかし 11 月 1 日にこのコンデンサーを充電し、自己放電の様子を継続して測定した結果、次のグラフのようにサラダ油を注いだコンデンサの自己放電は今までのコンデンサと比較すると大幅に性能が向上した。



考察

漏れ電流が減少した理由は、おそらく塩の析出がなくなったことによるものと推定している。



この図のように毛管現象で吸い上げられた食塩水の水分が蒸発し、食塩が再結晶するときには備長炭電極の電荷が失われるのではないかと考えた。