

コンデンサーの理科教材としての位置づけと定電流抵抗器の提案

コンデンサーの理科教材としての位置づけ

現行の指導要領では小学校の理科の教材に、新たにコンデンサーが取り入れられました。昨今、大容量の「電気二重層コンデンサー」は、その性能向上と低価格化に伴い、二次電池に代わる小電力のバックアップ電源として急速に身近なものとなり、電気部品としての重要性が増しています。

高等学校理科では、コンデンサーは物理の静電気および交流の単元で長く教材として扱われてきましたが、現行の教育課程ではまだ中学校理科には位置づけられていません。つまり、コンデンサーの理科教育上の扱いは断片的で一貫していないのが現状です。

回路素子の三役「抵抗」「コイル」「コンデンサー」を平等に扱い、磁気と電気の関係性を対比的に示して、より体系的な理解に導く理科の教育課程を小中高を通じて導入すべきだと思います。

コンデンサーはなぜ敬遠されてきたか

ほとんどの電気回路に使われていて、抵抗やコイルに勝るとも劣らないほど身近で重要な回路素子であるにもかかわらず、小中学校の理科でコンデンサーが取り上げられてこなかった理由は、「地味だから」という一言に尽きると思います。これまではコンデンサーに蓄えられる静電エネルギーが小さすぎて、目に見える顕著な現象を起こすことができないので教材化がためらわれていたのでしょう。

その結果、コンデンサーと静電エネルギーに関する学習は高校物理の後半で唐突に登場することになり、ほとんどの国民はコンデンサーについて知る機会がなく、高校の理科教員でもコンデンサーや交流回路に苦手意識を持つ人がいるという現状が生まれたのです。

しかし、時代は変わり、いまや容量が1Fを越える電気二重層コンデンサーが比較的安価に入手で

きるようになり、加えて小電力でも十分明るく輝くLEDや高性能小型モーターの登場もあって、コンデンサーで小学生にも体験させられるほどに「顕著な現象」を実現できる環境が整いました。高入力抵抗のデジタルテスターも普及してきたので、中学生以上では定量的な実験も簡単に行えるようになったのです。

理科教員はこの時代の流れに乗り遅れないようにしないとイケないと思います。

定電流電源のススメ

コンデンサーの式 $Q = CV$ (Q :電気量、 C :電気容量、 V :極板間電圧)をわかりやすく示すには、 $Q = It$ (I :電流、 t :時間)を使って時間とともに充電が進み、電圧 V が上昇していく様子を観察するのが一番直観的です。 I が一定であればグラフは原点を通るきれいな直線になり、中学生でも十分に理解ができます。

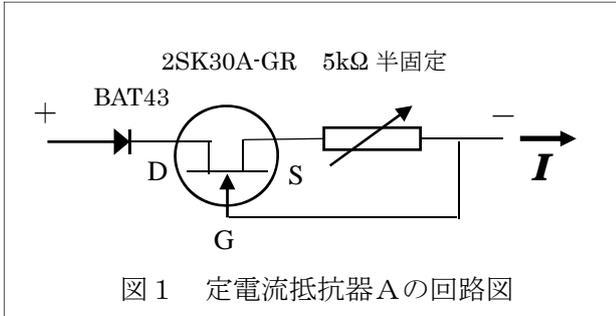
ただし、この実験のためには電圧にかかわらず I を一定に保つ、「定電流電源」という、これまであまり一般的でなかった器具を必要とするところがネックでした。これまでの苦勞の跡は文献1~3に見ることができます。

いまや大容量の電気二重層コンデンサー、高入力抵抗のデジタルテスターは比較的安価に手に入ります。すでに整備されている学校も多いでしょう。あとは定電流電源だけです。

本稿はコンデンサーの定量実験に欠かせないアイテムとしての定電流装置の普及を目指して執筆しています。実は定電流装置だけならFET(電界効果トランジスタ)やレギュレータIC(電圧安定化用の集積回路)を用いて比較的簡単に製作することができます。材料費は300円ぐらい。簡単なんだ付けができる程度のスキルがあれば十分に自作可能です。以下では、その構造と特性を簡単に紹介します。

定電流抵抗器Aの製作

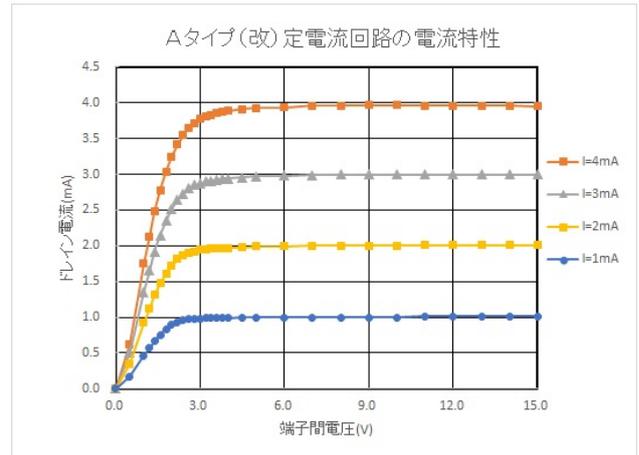
図1の回路はFETの使用例としてはごく基本的な定電流回路です。0.10~1.0F程度の電気二重層コンデンサーを試料とし、充電電圧5V以内で測定することを想定し、1~4mA程度の定電流が得られるようにパラメータを選びました。ダイオードBAT43は逆極性接続時の回路保護用です。



使いやすさ、わかりやすさに配慮して、1円硬貨50枚入りのコインケースに実装して、抵抗器のような形状にしてみました。これを回路の中に抵抗のように直列に接続すれば、自然に電流が一定になるというわけです。抵抗器と同様の感覚で回路の中に手軽に組み込んで使うというイメージでこの装置を「定電流抵抗器」と呼ぶことにします。

この装置の電流・電圧特性を図3に示します。半固定抵抗を小型ドライバで調整することで、約0.6~3.9mAの間で定電流を得ることができます。端子間電圧が3.0V以上であれば、電圧によらず極めて安定した定電流特性を示します。電圧の最大定格はFETのソース・ドレイン間の耐圧で決まり、使用した2SK30A-GRでは50Vです。

この定電流抵抗器を用いれば、図4のような簡単な装置でコンデンサーの充放電実験が生徒実験として行えます。写真の実験例では、1.0F（耐圧



5.5V)の電気二重層コンデンサーに短いバナナコードを半田付けして、テスターのプローブ端子に直接取り付け測定しています。

測定に先立って定電流抵抗器の電流値を、測定に使用する電流値（例えば1mA、2mAなど）に調整しておきます。調整はデジタルテスターをmAレンジの電流計モードで使用し、電池、定電流抵抗器、デジタルテスターをすべて直列につないで、図2の中央にある半固定抵抗を小型ドライバで回して所定の電流値になるようにします。一度設定すれば、途中で回路の接続を変更したりしても、その電流値はほとんど変化しません。1%程度の誤差範囲で安定しています。



図5は図4の装置で測定した結果のグラフです。定電流による充放電なので、時間に比例したきれいな直線のグラフが得られます。コンデンサーの式 $Q = CV$ がストレートに確認できます。

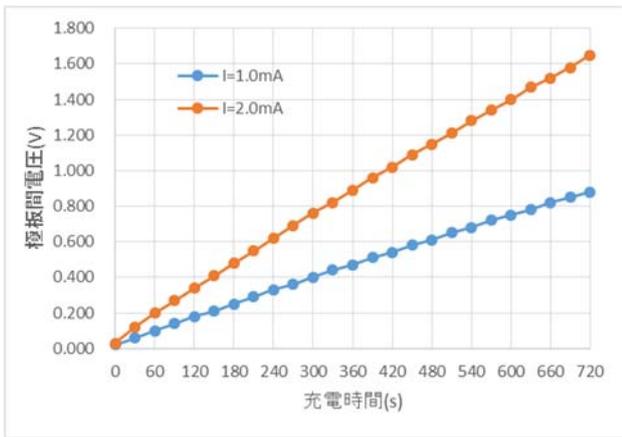


図5 コンデンサーの充電曲線 (1F、25Ω)

測定時の電圧の範囲に関しては、コンデンサーの耐電圧の上限と、定電流抵抗器が正常に動作する、3.0V以上の端子間電圧という条件に配慮します。例えば単三電池3本直列で約4.7Vの電源を用いる場合、充電実験はコンデンサーの極板間電圧が4.7-3.0=1.7V以内となるようにします。同じく放電実験では、端子間電圧が3.0Vのところまで測定を打ち切るようにします。

定電流抵抗器Bの製作

次に、もう少し大きな、数十mAの電流領域で動作する「定電流抵抗器B」を開発しました。可変三端子レギュレータIC、LM317Tを使用しています。三端子レギュレータは普通、定電圧を得るための安定化電源として使用しますが、出力端子(図6のOUT)とアジャストメント端子(図6のADJ)の間の電圧を基準電圧に保つように動作するという特性を利用して定電流を得ることもできます。LM317Tシリーズの場合、両端子間の基準電圧は1.25Vですので、これを両端子間にはさんだ抵抗値で割った値がこの抵抗を流れる電流となります。ADJ端子はほとんど電流を吸い込みませんから、この電流がそのまま出力電流となります。

LM317Tは放熱をしっかりとすれば1A以上の

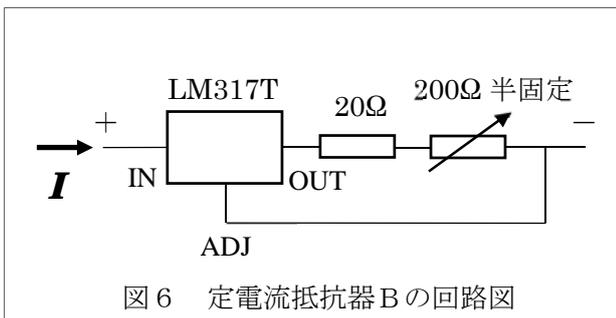


図6 定電流抵抗器Bの回路図



図7 定電流抵抗器Bの外観と内部

出力に耐えますが、コンデンサーの充放電実験やLED点灯用の制限抵抗としての用途に限れば、最大60mAをカバーすれば十分と考え、コストダウンと小型化のため放熱器は省略しました。

容器は百円玉用のコインケースとしました。実装の状態を図7に、電流特性の測定結果を図8に示します。3V以上の広い電圧範囲で安定した動作をしていることがわかります。

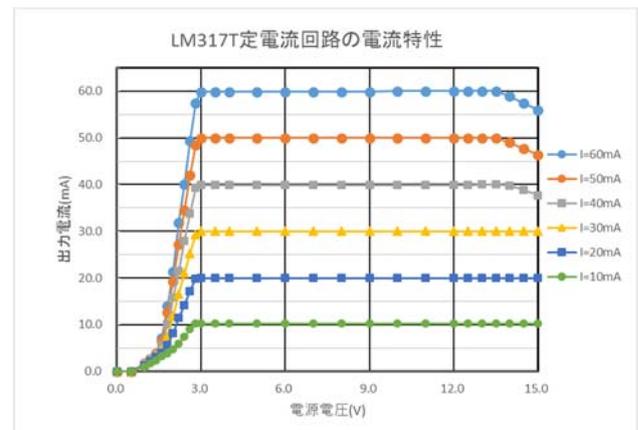


図8 定電流抵抗器Bの電流・電圧特性

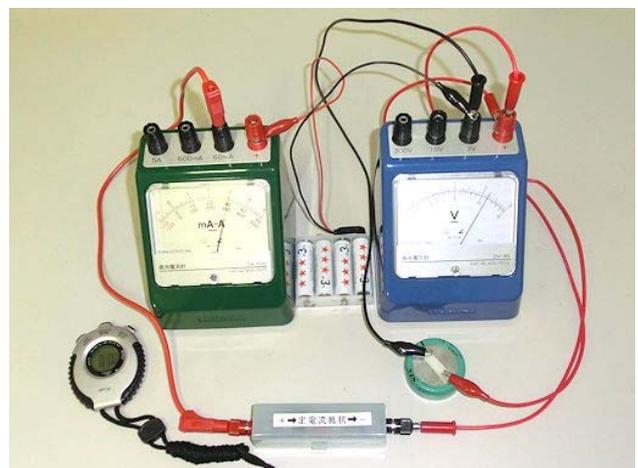


図9 定電流抵抗器Bによる実験例

図 9 は測定回路の例です。電流を比較的大きく取れるので内部抵抗が比較的小さい生徒用電圧計でも実験できます。図 10 は内部抵抗 2.5Ω $1.0F$ のコンデンサーの充電実験の結果です。

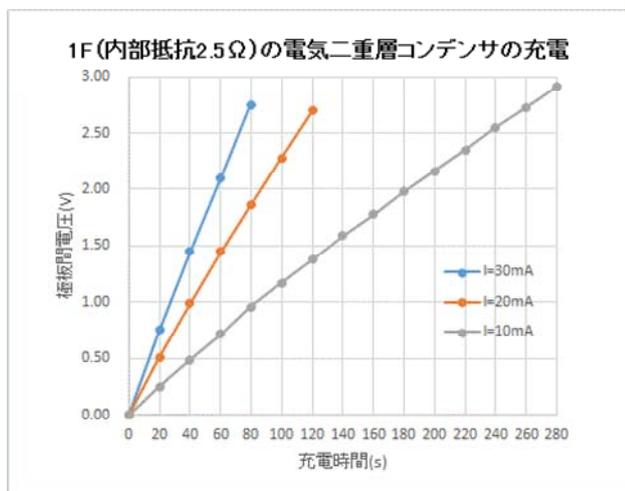


図 10 コンデンサーの充電曲線 ($1F$ 、 2.5Ω)

定電流抵抗器の使い分け

最後に、A・B 両タイプの定電流抵抗器の使い分けについて考えます。電気容量が約 $1F$ の電気二重層コンデンサーの充電実験を例にとります。

図 10 と図 11 は、同じ定電流抵抗器 B でそれぞれ約 $1F$ のコンデンサーを $20mA$ 、 $40mA$ 、 $60mA$ で充電したときのグラフです。両者の違いは測定開始直後の立ち上がり部に顕著に表れています。これは、コンデンサー自身の内部抵抗による電圧降下を反映しています。図 10 の試料の内部抵抗は約 2.5Ω 、図 11 の試料では 25Ω です。充電電流が大きいと内部抵抗の効果が無視できなくなります。

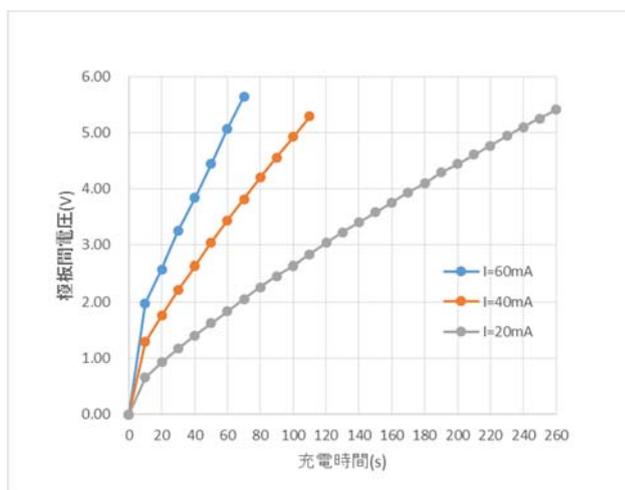


図 11 コンデンサーの充電曲線 ($1F$ 、 25Ω)

結論として、内部抵抗が大きい ($100\sim 200$ 円の安い) 電気二重層コンデンサーを試料とする場合は A タイプで充電電流を数 mA 程度にとどめれば内部抵抗の効果をほぼ無視できます。図 5 は図 11 と同じ試料を A タイプを使用して測定したものです。この場合、生徒用アナログ電圧計は使えません。電圧はデジタルテスターで測ります。

内部抵抗が小さい大型の電気二重層コンデンサー (2000 円以上でやや高い) が手元にある場合は、B タイプを使用し、数十 mA の大きな電流で短時間に測定することが可能です (図 10)。この場合は生徒用アナログ電流計・電圧計も使えます (図 9)。

B タイプは LED 用の制限抵抗としても使えます。LED には最適な動作電流があり、あまり大きな電流を流すと発熱により破損します。通常は $10\sim 20mA$ で動作させますが、電源電圧によって制限抵抗 (LED の保護のために直列に接続する抵抗) を交換するのは面倒です。「定電流抵抗器 B」を $10\sim 20mA$ に調整して、LED に直列接続しておけば、電源電圧を気にすることなく安心して、しかも一定の光量で LED を光らせることができます。

なお、文献 4 では A・B の間を補完し $2\sim 20mA$ をカバーする「定電流抵抗器 K」を紹介しています。これは基本的には B タイプと同じ回路で、図 6 の抵抗を 51Ω に、半固定抵抗を $1k\Omega$ に変更したものです。

参考文献

- 1) 安田明「電気二重層コンデンサーを用いた実験」昭和 58 年度 (第 15 回) 東レ理科教育賞受賞作品集
- 2) 山本明利「生徒実験：コンデンサーの電気容量 (湘南版)」
http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/hakuyo/library/physics/condenser_shonan.pdf
- 3) 山本明利「生徒実験：コンデンサー (湘南台版)」
http://www2.hamajima.co.jp/~tenjin/hakuyo/library/physics/condenser_genecon.pdf
- 4) 山本明利「高校教師が教える物理実験室」工学社
- 5) 東芝：電界効果トランジスタ 2SK30ATM データシート
- 6) ナショナルセミコンダクタ：可変型三端子レギュレータ LM317 データシート

定電流抵抗器の製作キットを実費でお分けしています。詳しくは下記 URL へ。

http://ypc.fan.coocan.jp/ypc/constant_current.htm