

小学校理科6学年「電気の利用」で使用されている 10F コンデンサーの物理特性

Physical Properties for the 10F Capacitor Which is Used in “Use of Electricity” of Science for Elementary School 6th Grade

山本 逸郎*・田中 緒人**

Itsuro YAMAMOTO*, Oto TANAKA**

【論文要旨】

小学校理科6学年の単元「電気の利用」では、コンデンサー、手回し発電機、発光ダイオードを使用した実験が設定されている。ここでは、10Fの極めて高い電気容量をもつ電気二重層コンデンサーまたはスーパーキャパシタと呼ばれる特殊なコンデンサーが使用されている。本研究では、この10F コンデンサーの種々の充電特性と放電特性を、教科書の実験と関連付けて測定した。

キーワード：小学校理科6学年，単元「電気の利用」，10F コンデンサー，手回し発電機，発光ダイオード

1. はじめに

平成20年の学習指導要領改訂¹⁾から小学校理科6学年の単元「電気の利用」では、コンデンサー、手回し発電機、発光ダイオードを使った実験が設定されている。現行の学習指導要領²⁾に基づいた教科書に記載されている実験の内容を見ていこう。教科書は青森県の全域で採用されている学校図書の理科教科書³⁾である。

図1の実験1は、3V用手回し発電機に豆電球とプロペラ付きモーターをそれぞれつないで、手回し発電機のハンドルを①ゆっくり回す、②速く回す、③逆に回すときのそれぞれの変化を確かめる実験である。実験結果を簡単に説明すると、手回し発電機を速く回すほど発生する電圧が大きくなるので、豆電球はより明るく点灯し、プロペラ付きモーターはより速く回転する。また、手回し発電機を逆回転で回すと電圧の＋が逆になる。豆電球は＋関係ないので点灯し、プロペラ付きモーターは逆回転する。

コンデンサーを使った実験は、図2に示す実験3に設定されている。すなわち、手回し発電機を同じ速さで一定の回数だけ回してコンデンサーに電気を蓄えて

1 実験 手回し発電機で、電流の大きさや向きを変えるにはどうすればよいか調べる

●準備 □手回し発電機 □豆電球 (2.5V用) □プロペラ付きモーター

①手回し発電機に、豆電球をつなぎ、ハンドルを回す。
●ハンドルを回す速さや向きを変えると、豆電球の光り方はどうなるか。

②豆電球のかわりにプロペラ付きモーターをつなぎ、ハンドルを回す。
●ハンドルを回す速さや向きを変えると、モーターの回り方はどうなるか。

回し方	ゆっくり回す	速く回す	逆に回す
豆電球			
モーター			

結果

回し方	ゆっくり回す	速く回す	逆に回す
豆電球	弱く光る	強く光る	光る
モーター	ゆっくり回る	速く回る	逆に回る

考察

手回し発電機で、電流の大きさや向きを変えるにはどうすればよいか考える。

- ハンドルを速く回すと、電流の大きさはどうなったか。
- ハンドルを回す向きを変えると、電流の向きはどうなったか。

結果から考える

わかったこと

- 手回し発電機は、ハンドルを速く回すと電流の大きさが大きくなる。
- 手回し発電機は、ハンドルを回す向きを変えると電流の向きが変わる。

図1. 手回し発電機の実験. 文献3)より転載

おく。次に、コンデンサーに豆電球と発光ダイオードをそれぞれつなぐが、その際に、簡易検流計（電流計）も一緒につないでおく。コンデンサーに蓄えた電

* 弘前大学教育学部理科教育講座

Department of Science Education, Faculty of Education, Hirosaki University

** 弘前大学教育学部学校教育養成課程小学校コース，令和5年3月卒業

3 実験 豆電球と発光ダイオードで、電気の使い方にちがいがあつて調べる


●準備 コンデンサー 手回し発電機 豆電球 (2.5V 用) 発光ダイオード
 スイッチ 検流計 (電流計) ストップウォッチ

●コンデンサーに、豆電球が光らなくなるまでつなぎ続け、コンデンサーに電気がたまっていない状態にする。

①手回し発電機をコンデンサーにつなぎ、コンデンサーに電気をためる。
 ●ハンドルは同じ速さで、一定の回転を回す。

②コンデンサーに、検流計と豆電球、スイッチをつなぐ。
 ●一定時間ごとに豆電球が光っているか確認し、そのとき流れる電流の大きさを測る。

③豆電球のかわりに、発光ダイオードをつなぎ、同じように調べる。



調べる時間	豆電球		発光ダイオード	
	光っているか	電流の大きさ	光っているか	電流の大きさ
30秒後				
60秒後				

検流計の使い方は223ページをよく読む。

結果

調べる時間	豆電球		発光ダイオード	
	光っているか	電流の大きさ	光っているか	電流の大きさ
30秒後	光っている		光っている	
60秒後	光っていない		光っている	

考察

豆電球と発光ダイオードで、光り続ける時間にちがいがあつた理由を考える。
 ○長く光っているほうは、使う電気の量は少なくなっている。

わかったこと

- コンデンサーにためた電気を、つなぐものによって使える時間がちがうのは、使う電気の量がちがうからである。
- 発光ダイオードは、豆電球と比べて使う電気の量が少ない。

図2. コンデンサーの実験。文献3)より転載

気を使って豆電球と発光ダイオードをそれぞれ点灯させたときの30秒後と60秒後の点灯の状態と電流の大きさを測定するという内容である。手回し発電機を回す速さと時間によってコンデンサーに蓄えられる電気の量は変わってくるので、その電気量によっていろいろな結果が予想されるが、教科書会社が想定している結果は、図2の「結果」の表に書かれているように「豆電球は、30秒後はまだ点灯しているが、60秒後には消灯している。一方、発光ダイオードは、60秒後もまだ点灯している。」である。

ここで、教科書の実験で使用されているコンデンサーについて触れておく。コンデンサーの性能を示す物理量として、どれくらい電気を蓄えることができるかの指標となる電気容量Cが挙げられる。従来型のコンデンサーの電気容量は、大きいものでも電解コンデンサーの1000 μ F (=0.001F)程度であった。1970年代後半、日本企業の研究者が、極めて大きな電気容量の値を持つ電気二重層コンデンサーまたはスーパーキャパシタと呼ばれるコンデンサーの開発に成功した。その電気容量は、従来型の1000倍や10000倍以上の1Fや10Fの値をもつ。教科書の実験では、この10Fスーパーキャパシタを使用している。コンデンサーの性能を示すもう一つの量として耐電圧(定格電圧、最

大使用電圧)が挙げられるが、スーパーキャパシタは、この耐電圧の値が低いのが欠点である。現在、教材会社で取り扱っている10Fコンデンサーの耐電圧は、2.5Vが主流である。著者の一人、山本が以前に出した論文⁴⁾の中で、スーパーキャパシタが巨大な電気容量をもつ原理(理由)を、製造会社の資料に基づいて、できるだけかみ砕いて説明しているので、興味のある方は参考にされたい。

図3に、ヤガミ取り扱いの2種類の2.5V、10Fコンデンサー⁵⁾を示す。端子の部分が違うが、使っているスーパーキャパシタは、どちらもPanasonic製GOLD CAP, HZシリーズ、品番EECHZ0E106⁶⁾である。教科書では、右側のミノムシクリップのタイプを使っているが、本研究では、使いやすさの点から左側の台付きタイプを使用した。



図3. 使用した10Fコンデンサー

本研究では10Fコンデンサーの種々の物理特性を、教科書に記載されている実験と関連付けて測定した。具体的には、①手回し発電機をつないでハンドルを回す速さを変えたときの充電特性の測定。②抵抗器をつないだときの放電特性の測定、理論式とのフィッティングとコンデンサーの電気容量Cの導出。③豆電球をつないだときの放電特性の測定。④種々の発光ダイオード(定電流ダイオード付き、抵抗付き)をつないだときの放電特性の測定を行った。

2. 実験方法

図4にコンデンサーの充電特性と放電特性を測定したときの回路図を示す。2連の切り替えスイッチ(アンテナスイッチ)の真ん中の端子に10Fコンデンサーと電圧計を並列に接続する。切り替えスイッチの右側が充電回路で、電源装置または手回し発電機を接続する。切り替えスイッチの左側が放電回路で、豆電球や発光ダイオード等の負荷を接続する。なお、回路図では、電流計が充電側と放電側の両方に接続されている

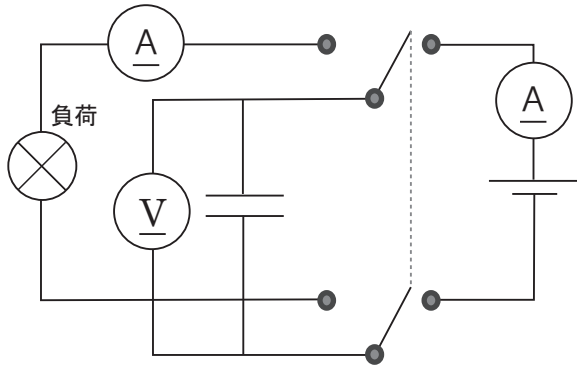


図4. 測定回路図

が、実際に測定する際は、1台の電流計を充電特性は充電回路側に、放電特性は放電回路側につなぎ変えている。電圧計と電流計は、デジタルテスター（SANWA製PC20）を使用した。このテスターは、パソコンとUSBインターフェースでつないで、パソコン上に任意の秒単位で測定データを取り込むことができる。今回の測定では、1秒間隔で電圧と電流の値をほぼ同時に読み込んだ。

手回し発電機による充電特性を測定する場合は、回路図の電源の位置に手回し発電機をつなぎ、切り替えスイッチを右側の充電回路側に倒して測定した。このとき、テスターの電圧レンジは4.000V（内部抵抗11MΩ）、電流レンジは4.000A（内部抵抗0.01Ω）に固定した。

一方、放電特性を測定する場合は、初め、切り替えスイッチを右側の充電回路側に倒して、定電圧電源（TEXIO製PR18-5A）を使って2.5Vで10分間程度充電しておく。その後、切り替えスイッチを左側の放電回路側に切り替えて、コンデンサーを放電させたときの電圧と電流を測定した。このときのテスターの電圧レンジの4.000V固定は充電特性と同じだが、電流レ

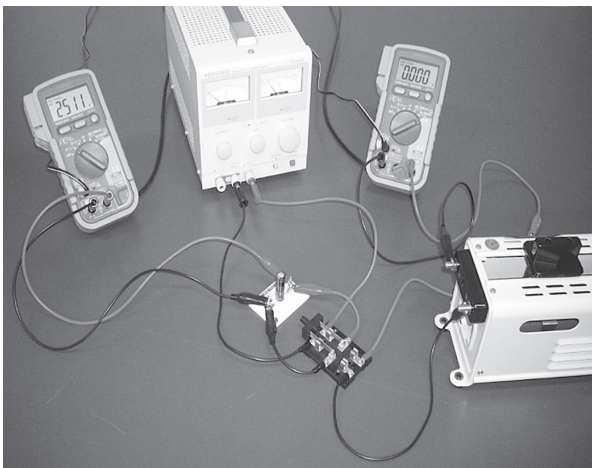


図5. 測定装置の写真

ンジは、流れる電流の大きさに応じて、予め4.000A、400.0mA（内部抵抗1Ω）または40.00mA（同1Ω）を選択し、選択したレンジで固定して測定した。

図5の写真は、抵抗器の放電特性を測定する際の装置の配置である。上側真ん中が定電圧電源装置で、右側で、途中で写真から切れているのが可変抵抗器である。手前真ん中の切り替えスイッチは、現在、充電回路側になっており、コンデンサーの充電がほぼ終わってこれから放電側に切り替える前の状態である。

3. 手回し発電機による充電特性

手回し発電機を使って10Fコンデンサーを充電したときの充電特性から始めることにする。使用した手回し発電機は、教科書で使われているのと同じヤガミ取り扱い3V用手回し発電機⁷⁾（図6）である。手回し発電機は、写真右側のハンドルを回すと、中に組み込まれている直流モーターの回転軸が回転して、出力端子に電圧が発生する。

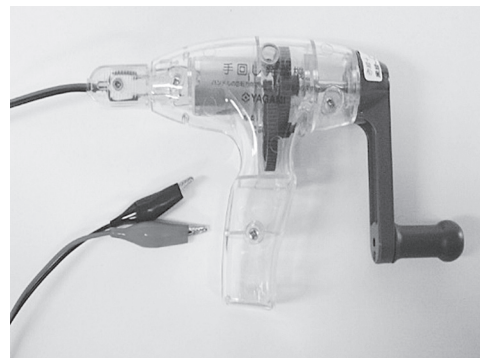


図6. 3V用手回し発電

最初に、電圧とハンドルを回す速さの関係を押さえておく。表1に、その結果をまとめて示す。測定の際は、手回し発電機をアナログ式の電圧計につないで、一定の電圧になるようにハンドルを回した。そして、ハンドルを回す速さは、10秒間に回した回数を数えて、その回数を10で割って求めた。

表1. 手回し発電機の実出力電圧とハンドルを回す速さの関係

出力電圧 [V]	ハンドルを回す速さ [回/s]
1.5	1.7
2.0	2.2
2.5	3.0

図7に、手回し発電機を1.5V程度で回しながら10Fコンデンサーを充電させたときの充電特性を示す。図

の (a) はコンデンサーの電圧 V の時間変化 (V - t 特性), (b) は電流 I の時間変化 (I - t 特性) である。ここで, コンデンサーに蓄えられる電荷の電気量 Q , コンデンサーの電気容量 C と電圧 V の間には,

$$Q = CV \quad (1)$$

の関係式が成り立つ。特定のコンデンサーに対して, C は定数と見なすことができるので, V はコンデンサーに蓄えられている電気量 Q を反映していると見ることができる。なお, 測定では, グラフ中に矢印で示した15秒後に, 手回し発電機のハンドルを回し始めて, 充電を開始している。

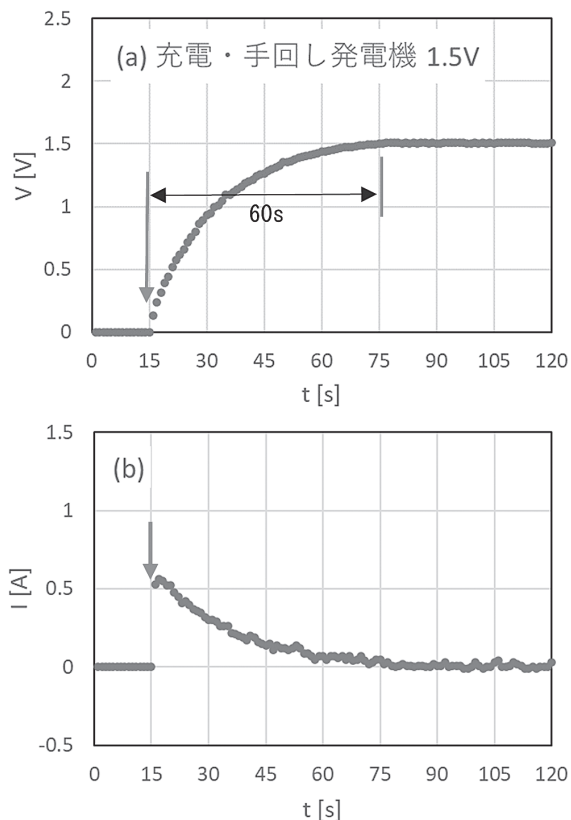


図7. 手回し発電機を1.5V程度で回したときの充電特性。
(a) V - t 特性. (b) I - t 特性

充電開始と共に, (a) の V は, 0V から増加していき, 約60秒後にほぼ充電電圧の約1.5V に達する。このとき, 電圧の増加は直線的ではなく, 徐々に増加する割合が小さくなり, 1.5V に漸近していくことに注意してほしい。一方, (b) の I は, 充電開始直後が一番大きく, 時間と共に減少しながら0A に漸近していき, 約60秒後にほぼ0A になる。

コンデンサーの充電過程の理論式は, 次の2式で与えられる⁸⁾。

$$V = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right) \quad (2)$$

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

(2) 式の V は, $t=0$ の0から指数関数的に充電電圧 V_0 に向かって増加していく式を表し, (3) 式の I は, 初期電流 I_0 から指数関数的に0に向かって減少していく式を表す。図7のグラフは, V と I が理論式の通りに変化していることを示している。

次に手回し発電機のハンドルを回す速さを変えて, 異なる電圧で充電したときの充電特性を見ていくことにする。図8の (a) は2.0V程度で充電したときの V - t 特性, (b) は2.5V程度で充電したときの V - t 特性である。ここでも図7と同様に, 矢印で示した15秒後に充電を開始している。(a) (b) どちらのグラフも, 目的の V_0 に向かって指数関数的に増加していく。ここで注目してほしいのは, 図7 (a) において, ほぼ V_0 に達するまでの時間は約60秒であったが, 図8の (a) (b) も同じ約60秒でほぼ V_0 になっている点である。この理由は, (2) 式において V が増加していく程度を決める量は, 指数関数の指数部の係数 $\frac{1}{RC}$ である。ここで, R は回路の抵抗成分で, 充電回路の場合, 主に手回し発電機の内部抵抗から生じている。また, C はコンデンサーの電気容量である。すなわ

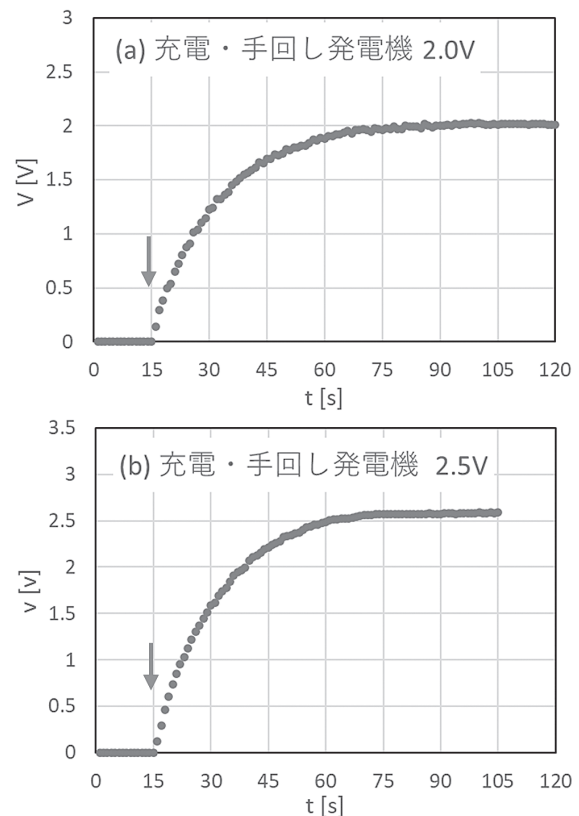


図8. 手回し発電機の V - t 特性. (a) 2.0V程度で回したとき. (b) 2.5V程度で回したとき

ち、手回し発電機のハンドルを回す速さを変えて V を変えても RC の値は変わらず定数と見なすことができる。結果として、 $V-t$ 特性は、 V_0 の値は違うが、 V の増加していく振る舞いは同形になる。

手回し発電機のハンドルを回す速さが一定かどうかは、 $I-t$ 特性に顕著に現れる。具体例を見ていこう。図9 (a) は、2.3V 程度で充電したときの $I-t$ 特性の一例である。図7 (b) のグラフと比べると、充電中のデータ点がばらついているのが目にとまる。ただし、データ点のばらつきの幅は、それなりに安定している。この場合、ほぼ V_0 になるまでの時間も約60秒と変わらず、特に問題はないと言える。手回し発電機の充電特性の測定は、数多く行っているが、図9 (a) のような $I-t$ 特性が一定のばらつき幅をもった結果は、割と見られる。それに対して、図9 (b) は、2.5V 程度で充電したときの $I-t$ 特性の一例であるが、明らかに I が大きく波打っていて、回し方にムラがあることがわかる。このような場合、ほぼ V_0 になるまでの時間も、測定によって約50秒から約75秒までばらつきが生じ、安定しない。グラフは示さないが、このときの $V-t$ 特性には、大きな波打ちが見られず、 V がなめらかな曲線になっていないことがわかる程度である。

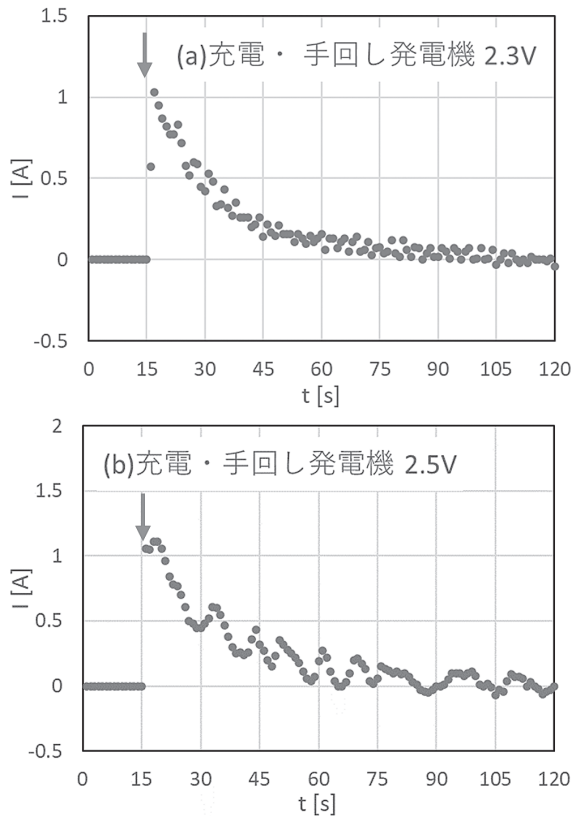


図9. 手回し発電機の $I-t$ 特性。(a) 2.3V 程度で回したとき。(b) 2.5V 程度で回したとき

このような違いが生じる理由は、 I はその時間・時間に流れる電流の瞬間量なのに対し、 V は0V から充電電圧 V_0 までコンデンサーに蓄えられていく電圧の積算量だからである。

4. 抵抗器による放電特性

この節では、コンデンサーの放電特性を測定し、理論式とのフッティングを試みる。そのために、放電回路の負荷として、抵抗の値が一定値をもつ抵抗器（可変抵抗器）を使用した。

コンデンサーの耐電圧である約2.5V で充電し、約 6Ω の抵抗器で放電させたときの放電特性を図10に示す。前節の充電特性とは違って、ここでは放電開始時間を0秒にしている。横軸の時間は300秒 (=5分) まで取っているが、測定は、電流計の値が0.001A 未満になるまでの約19分間続けている。

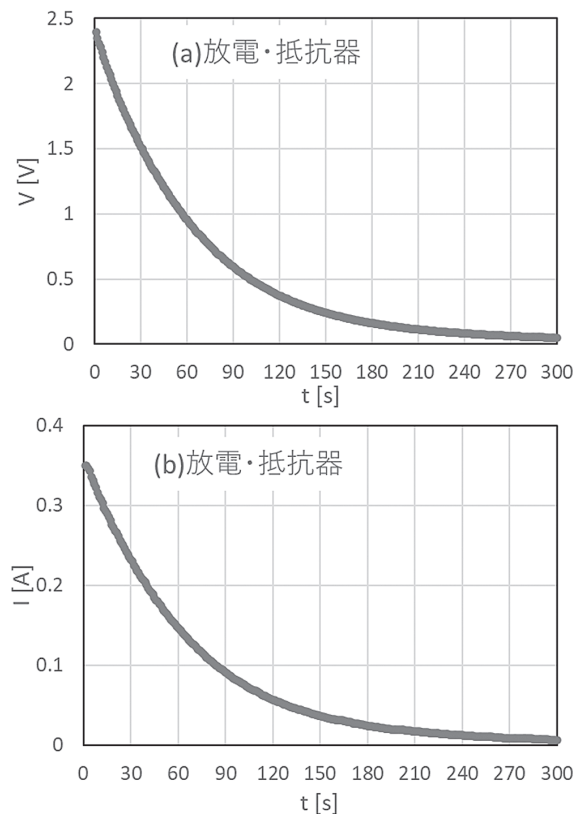


図10. 負荷として抵抗器をつないだときの放電特性。(a) $V-t$ 特性。(b) $I-t$ 特性

放電特性のグラフを詳しく見ていく前に、第1の解析として、図 (b) の $I-t$ 特性からコンデンサーの電気容量 C を導出してみる。その具体的な手順は、コンデンサーに蓄えられる電気量 Q は、電流 I の時間積分で与えられる。

$$Q = \int I(t)dt \quad (4)$$

測定は、1秒単位で行っているのので、放電開始からの I の測定データを順に積算していくと、 Q が求まる。その Q の値を放電開始直前の電圧で割れば、(1) 式より、コンデンサーの C が導出される。図 (b) の $I-t$ 特性のデータを使って計算すると、 $Q=25.434C$ となり、 $C=10.15F$ が得られる。すなわち、製造会社の公称値10F にほぼ等しい。

図10に戻って、放電特性を詳しく見ていこう。コンデンサーの放電過程の理論式は、次の2式で与えられる⁸⁾。

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

(5) 式の V は、初期電圧 V_0 から指数関数で0に向かって減少していく式を表す。 I は、充電の I の式と同じ形になる。図10の (a) も (b) も、(5) 式と (3) 式に従っているように見えるが、もっとはっきり示すためには、縦軸を対数スケールにした片対数グラフで表示するとよい。すなわち、(5) 式と (3) 式の

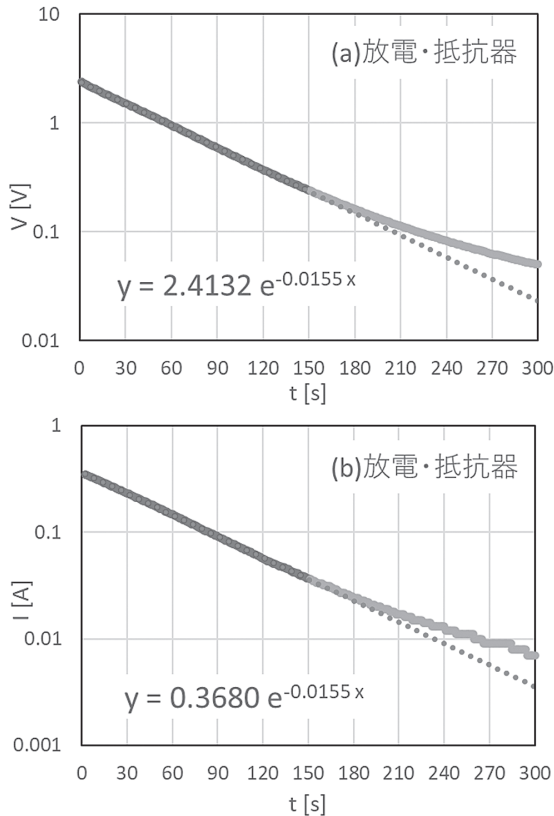


図11. 抵抗器の放電特性 (縦軸: 対数目盛).
(a) $V-t$ 特性. (b) $I-t$ 特性

両辺に対して、対数を取って変形すると、直線を表す式が得られる。

図11は、図10の縦軸を対数スケールに直した放電特性である。(a) の V も (b) の I も、最初は時間と共に直線的に減少していく。しかしながら、途中から直線から上側にずれ始め、時間と共にそのずれ幅が大きくなっていくのがわかる。点線で示した直線は、Excelの近似関数機能で求めた指数関数のフィッティング直線で、グラフ内にその直線を与える式も書かれている。なお、フィッティングしたデータ範囲は、十分に直線上に乗っていると判断した150秒までのデータ点を使った。

2つのフィッティング式を使って、第2の解析を行う。表2にその結果をまとめた。すなわち、初期電圧 V_0 と初期電流 I_0 から回路の抵抗 R を求める。その R を使って、指数部の係数 $\frac{1}{RC}$ の値から C を導出する。このようにして C を求めると、表の一番下の行に示したように9.84F が得られた。 $I-t$ 特性の面積から導出した第1の解析結果10.15F よりも、3%ほど小さい値になるが、これは、これは、第1の解析では、図11の片対数グラフにおいて、途中で理論式の直線から上側にずれる部分も Q の計算には入ってくるからである。そういう意味では、第1の解析方法で求めた値の方が本当の C を反映しているといえる。放電特性において、測定データが理論式の直線から途中で上側にずれていくことは、スーパーキャパシタでは、普通に見られる現象のようで、前述の山本の論文⁴⁾でも、この現象を取り上げている。

表2. フィッティングの式から C の導出

V_0 [V]	2.4132
I_0 [A]	0.3680
$R(=V_0/I_0)$ [Ω]	6.558
$1/RC$	0.0155
RC [$\Omega \cdot F$]	64.5
C [F]	9.84

5. 豆電球による放電特性

教科書の実験でも設定されている豆電球をつないだときの放電特性を見ていくことにする。使用した豆電球は乾電池2個直列用の定格2.5V, 0.3A の豆電球である。図12に、2.5V で充電したコンデンサーを、豆電球で放電させたときの $V-t$ 特性 (図 (a)) と $I-t$ 特性 (図 (b)) を示す。図 (a) の V は、図10 (a) と

同様に指数関数的に0に向かって減少しているように見えるが、特徴的なのは、図(b)の I で、90秒の手前にこぶができています。豆電球の点灯時間は図(a)に書き込んでいるように電圧が約0.9Vを切るまでの約75秒間であった。すなわち、前述のこぶは、豆電球が消灯してまもない時間に発生していることがわかる。

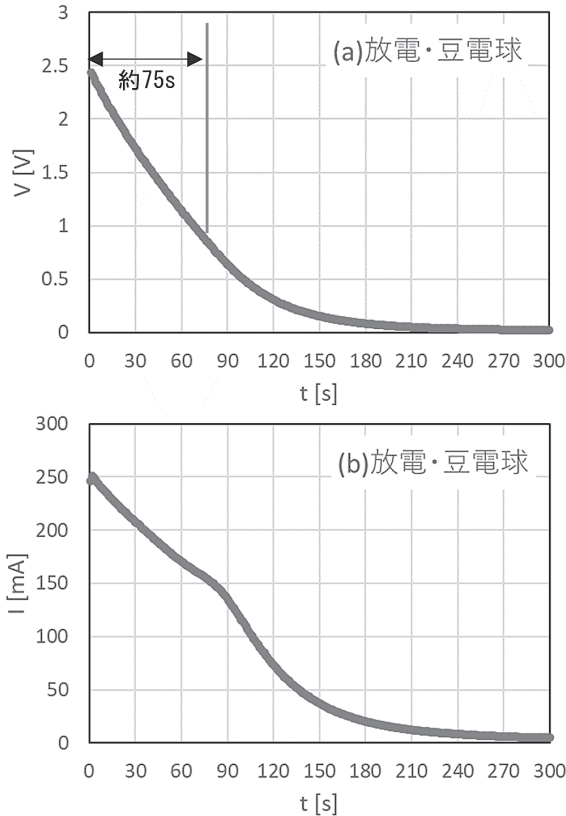


図12. 豆電球をつないだときの放電特性。(a) $V-t$ 特性。(b) $I-t$ 特性

豆電球のもつ抵抗は一定でなく、豆電球の明るさ、すなわち、フィラメントの温度に依存する。そこで、豆電球の電圧 V と電流 I の関係、 $I-V$ 特性を測定した。なお、充電特性と放電特性以外の測定は、テスターの示す値を、直接目で読み取ってノートに記録しながら行っている。図13(a)がその結果で、豆電球の $I-V$ 特性である。図13(b)は、図(a)の I と V から豆電球の抵抗値 R を計算して、 V に対してプロットした $R-V$ 特性である。まず、図(a)の $I-V$ 特性から見ていくと、 I は、最初の0.1Vまでの立ち上がり部分では、直線的に増加するが、すぐに増加は鈍くなり、その後、 V の増加と共に I は、ゆっくりとゆるやかなカーブを描いて増加していく。同じ V に対応する図(b)の $R-V$ 特性では、 R は最初の約0.9Ωから V と共

に徐々に増加していくが、よく見ると、0.75Vあたりで、増加の傾きが少し変わっているのがわかる。これは豆電球の点灯または消灯をはさんで、フィラメントの温度の上昇または下降の仕方が変わった結果、 R の傾きが変化したと考えることができる。これが、図12(b)の $I-t$ 特性のこぶをつくっている。

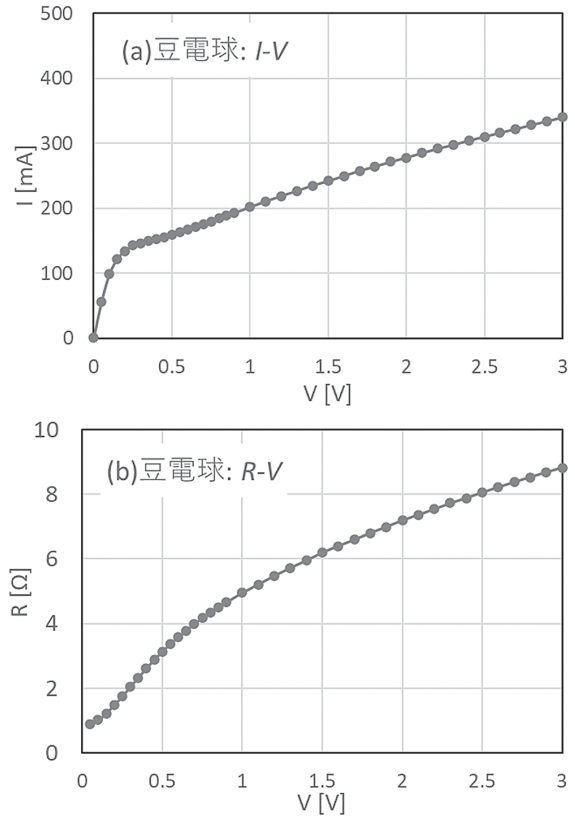


図13. 豆電球の特性。(a) $I-V$ 特性。(b) $R-V$ 特性

6. 定電流ダイオード付き発光ダイオードによる放電特性

発光ダイオード(以下、その略称LEDを使用)をコンデンサーにつないだときの放電特性に入る前に、LEDについて簡単に説明しておく。LED素子の2本の端子に電圧を加えて電流を流せば、LEDは光るわけであるが、実際はそんなに簡単な話ではない。LEDは、製品ごとに順方向電圧 V_F (点灯する方向である順方向に加える最適電圧)が決まっています。通常、赤や黄色は2.0V程度、青や白は3.0Vから3.4V程度の値をもつ。その V_F を加えると、LEDには定格電流または最大順方向電流(順方向に流すことのできる最大直流電流)が流れる。定格電流は、20mA、30mA、50mAと製品によっていろいろあるが、普通は20mAで考えておけばよい。要するに、 V_F 以上の電

圧をLEDの端子間に加えると、定格電流以上の電流が流れてしまい、LED素子はだめになる。したがって、家電製品などに組み込まれているLEDでは、抵抗を直列に入れて電圧降下によってLED端子間の電圧を V_F よりも低く設定している。しかしながら、元の電圧の値が変わると抵抗の値も変えないといけないので、理科の教材としては使いにくい。そこで、教材会社で販売しているLEDは、抵抗の代わりに定電流ダイオード（以下、その略称CRDを使用）を直列につないだLEDの製品⁹⁾が販売されている。CRDとは、定格10mAなら電流を最大10mA以上流れないように制限する特殊なダイオードである。例えば、6Vや9Vの電圧をLED素子単体に加えると、加えた瞬間にLEDの発光部が飛んでしまうが、そのような電圧をCRD付きLEDに加えても制限された10mAしか流れないので、普通に明るく点灯する。

図14(a)に実験で使用したCRD付き赤LED⁹⁾を示す。発光部分であるプラスチックの下から2本の導線が出ているが、矢印で示した右側の導線の少し膨らんでいる部分にCRDが隠れている。

図14(b)に、2.5Vで充電したコンデンサーをCRD付き赤LEDで放電させたときの $I-t$ 特性を示す。横軸の時間は600秒(=10分)まで取っている。 I は、 $I_0=3.66\text{mA}$ から600秒後の 2.61mA までゆっくり減少していく。グラフは示さないが、 V も、 $V_0=2.509\text{V}$ か

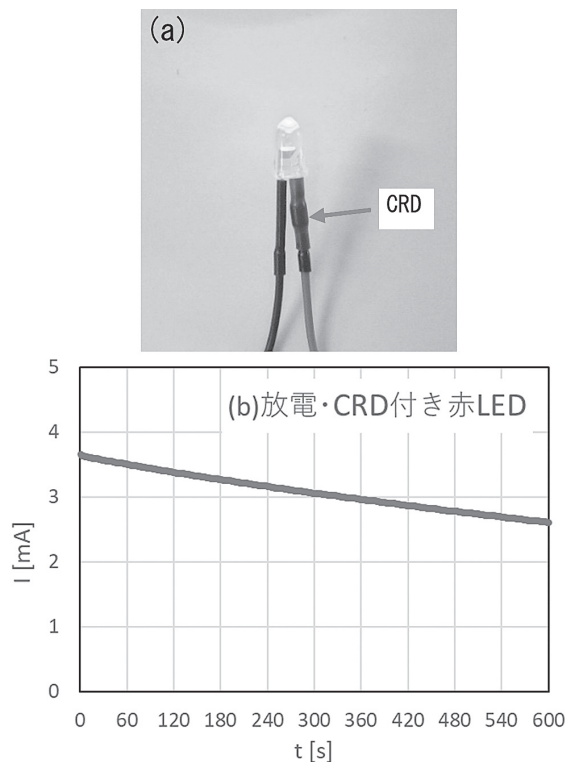


図14. (a) CRD付き赤LED. (b) その $I-t$ 特性

ら600秒後の 2.283V までゆっくり減少する。LEDの点灯時間に関しては、グラフの10分間はもちろん数時間後も、充分明るく点灯していた。 I_0 の値 3.66mA (I の最大値)は、LEDの定格電流 20mA から考えると、だいぶ小さめだと思いかもかもしれないが、図14(a)に示したようなLEDの発光部分のプラスチックが透明な超高輝度LEDは、このような小さな順電流でも充分明るい。何十年前かまでの古いLED(プラスチックが半透明でLEDの色に着色されていた)では、数mAでかなり暗くなっていた。そういう意味では、本研究で取り上げた小学校の実験は、スーパーキャパシタの開発に加えて、LEDの改良・発展の恩恵も受けて、初めて可能になった実験だと言うことができる。

ここで、赤LED素子単体の $I-V$ 特性を見ておくことにする。 $I-V$ 特性の測定で使用した赤LED素子¹⁰⁾は、電子部品を扱う通販サイトから購入したもので、厳密には図14に示した教材会社のCRD付き赤LEDの素子とは違う製品になるが、同じ色ならば、 $I-V$ 特性はそんなに変わるものではない。図15に、得られた結果を示す。 I は、 1.55V までは 0.0mA が続くが、 1.7V あたりから急に立ち上がる。この振る舞いは、高校物理の教科書に記載されている(「発光」の付かない普通の)ダイオードの順方向特性のグラフと目盛りが違っただけで同じである¹¹⁾。定格電流を 20mA とすると、グラフより、順方向電圧 $V_F=1.93\text{V}$ が得られる。

CRD付き赤LEDの $I-V$ 特性は、図15とどう違うのだろうか。図16に、CRD付き赤LEDの $I-V$ 特性を示す。図(a)では、 V を 10V まで加えているが、 2V 手前から増加し始める I は、 4V 過ぎから次第に増加の割合が小さくなり、 8V でほぼ一定値 15mA になる。この結果から、この製品は定格 15mA のCRDが使われていることがわかる。図(b)は、横軸 V の

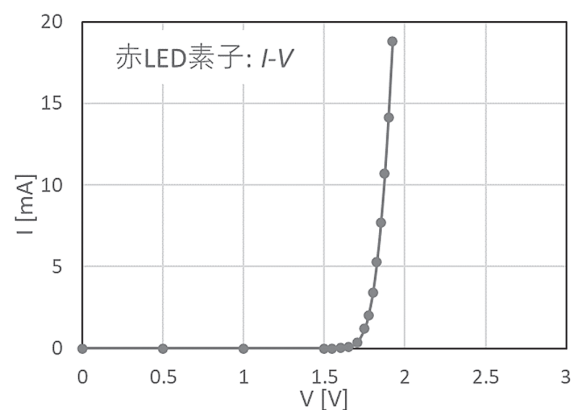


図15. 赤LED素子の $I-V$ 特性

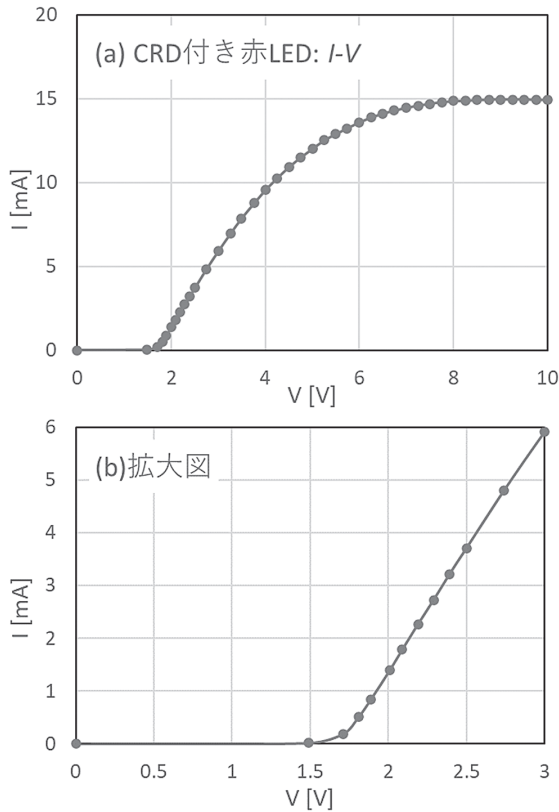


図16. (a)CRD 付き赤 LED の I - V 特性. (b)その拡大図

ケールを図15と同じ3Vにした図(a)の拡大図である。 I は、図15の素子単体と同じ1.7Vあたりから立ち上げるが、増加の仕方はもっとゆっくりで、2.0Vで約1.4mA、2.5Vで約3.7mA、3.0Vで約5.9mAになる。これらの結果からわかることは、CRD付きLEDの順方向電流が10mAを超えるのは、 V がある程度高い4V以上のときであり、3V用手回し発電機では、CRD付きLEDの本来の性能を発揮できていないということである。

7. 抵抗付きLEDによる放電特性

普通、LEDは抵抗Rを直列につないで使用することを前節で述べた。それでは、R付きLEDの I - V 特性はどうなるのだろうか。図17(a)の写真は、図15の測定に使用した赤LED素子に100Ωの抵抗を簡易的にはんだ付けしたR付き赤LEDである。ここでなぜ100Ωにしたのかを説明しておく。手回し発電機の最大出力3Vに対して、赤LEDの順方向電圧 V_F を2Vとすると、3Vから2Vが取られて、Rには残りの1Vがかかる。そこに順方向電流10mAを流すには、 $1V/10mA=100\Omega$ を選択すればよい。なお、順方向電流は、定格電流20mAに対して、普通は10mA程

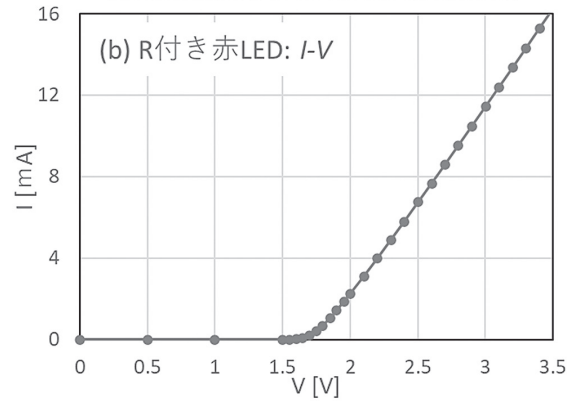
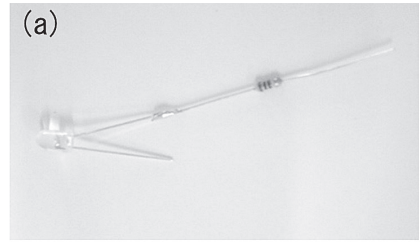


図17. (a)作成したR付き赤LED. (b)その I - V 特性

度で使用する。そのR付き赤LEDの I - V 特性を、図17(b)に示す。 I が始めの0.0mAに対して1.7Vあたりから立ち上がるのは、赤LED素子単体(図15)およびCRD付き赤LED(図16(b))と同じである。その後の I の増加は、CRD付き赤LEDよりも大きく、2.0Vで約2.3mA、2.5Vで約6.7mA、3.0Vで約11.4mAになる。ここで、Rの見積りの際は3Vのとき10mAで考えたのに対して、測定値が少し高めの11.4mAになった理由は、①赤LEDの V_F が2Vよりも低めの1.93Vであること、②使用したRの抵抗値の誤差(カーボン抵抗の誤差は5%)に起因する。

2.5Vで充電したコンデンサーにR付き赤LEDをつないだときの I - t 特性を、図18に示す。ここでも、横軸の時間は600秒(=10分)まで取っている。 I は、 $I_0=6.50mA$ から600秒後の3.22mAまで減少していく。

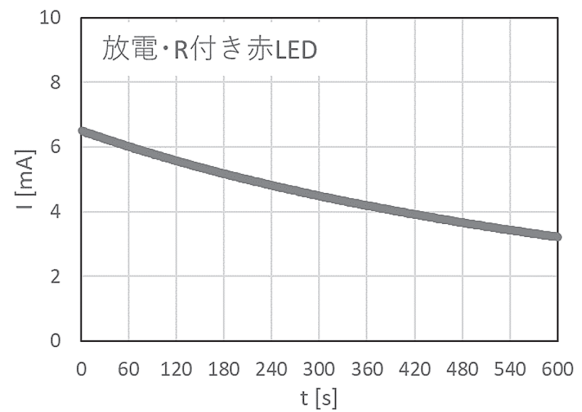


図18. R付き赤LEDをつないだときの I - t 特性

この I の減少幅は、 I の値が大きい分、図14に示したCRD付き赤LEDの I の減少幅よりも、少し大きめになっている。グラフは示さないが、 V も、 $V_0=2.505V$ から600秒後の2.124Vまで減少する。LEDの点灯時間についても、CRD付き赤LEDと同様、数時間後でも充分明るい。教材会社のカタログ¹²⁾を見ると、3V用手回し発電機で使うLEDとしてCRD付きLEDを推奨しているが、3V用手回し発電機に使用を限定するのであれば、R付きLEDを使用しても何の問題もない。

8. 最後に

教科書の実験に関して1点だけ述べると、手回し発電機を回してコンデンサーを充電する際、教科書³⁾では一定の回数を回すように書かれている。教科書会社の指導書¹³⁾を見ると、60回程度を想定しているようである。赤LEDを点灯させるためには、少なくとも2V以上充電させる必要がある。表1より手回し発電機に2Vを出力させるためには、約2.2回/sで回す必要があるため、30秒弱で60回を回してしまう。図8(a)の充電特性より、30秒はまだ充電の途中段階であることがわかる。充電の途中段階のコンデンサーを使って放電の実験を始めても、児童のグループ毎の充電の状態を揃えるのは、無理だというのが正直な感想である。教科書では、充電前のコンデンサーの状態を揃えるために、豆電球が光らなくなるまでつないでから充電を始めるように書かれているが、図12(a)を見ればわかるように、豆電球が消灯してもコンデンサーにはまだ電気がたまっている。著者らは、「一定の回数でなく一定の時間で回す」ことを提案したい。3V用手回し発電機と10Fコンデンサーの組み合わせだと60秒間回すことで、充電状態の不揃いは大幅に改善されると考える。

本研究の内容を参考にして、より良い授業を実践してもらいたい。

文献および註

- 1) 文部科学省：小学校学習指導要領解説 理科編（大日本図書，平成20年8月）59-60.
- 2) 文部科学省：小学校学習指導要領（平成29年告示）解説 理科編（東洋館出版社，平成30年2月）82-83.
- 3) 霜田光一ほか：みんなと学ぶ小学校理科6年（学校図書，平成31年3月検定済み）174-199.
- 4) 山本逸郎：小学校理科6年「電気の利用」の中の手回し発電機とコンデンサーを用いた実験について，弘前大学教育学部紀要，107（2012）51-64. この論文は，12V用手回し発電機と1Fコンデンサーを使った実験について論じている。
- 5) ヤガミ取扱い，台付コンデンサー（商品コード6106300），リード線付コンデンサー（商品コード6106600）。
- 6) ABC0000C47.pdf：Panasonic INDUSTRYのHP（<https://industrial.panasonic.com/jp/products/capacitors/edlc>）から閲覧可能。ただし，現在は生産終息品。
- 7) ヤガミ取扱い，発電くんJ（商品コード5407200）。
- 8) 例えば，山下芳樹監修，山本逸郎ほか：「物理の学び」徹底理解 電磁気学・原子物理・実験と観察編（ミネルヴァ書房，2017年7月初版）88-90.
- 9) ナリカ取扱い，保護付LED（定電流ダイオード）赤（Cat.No.P70-0596-01）。
- 10) OptoSupplyのOSHR5111A，秋月電子通商（<http://akizukidenshi.com/>）から購入（通販コードP-00280）。また，同サイトには，多数の各種同等品が販売されている。
- 11) 例えば，植松信夫ほか：高等学校理科用 物理改訂版（啓林館，平成29年2月検定済み）268.
- 12) ナリカ総合カタログ Vol.57（ナリカ，2021・2022年度）234.
- 13) 霜田光一ほか：みんなと学ぶ小学校理科6年教師用指導書朱書編（学校図書，令和2年2月）205.

(2023. 1. 10 受理)