

乾電池の種類の違いによる消耗経過の比較

The differences in battery life of several kinds of dry battery.

井 頭 均 *

Abstract

I compared the differences in battery life for several kinds of dry battery when each was connected to a small incandescent light bulb. When I used a manganese battery, the voltage decreased over time. It dropped below 1.0V after 50 minutes. The light went out after 2 hours and 20 minutes.

When I used an alkaline battery, the voltage decreased gradually to 0.8V and remained there for 5 hours and 30 minutes. After that the voltage suddenly dropped to 0.17V and after 10 minutes the light went out.

A nickel-MH (NiMH) battery maintained a voltage higher than 1.0V for 6 hours and 40 minutes, then that light went out, too. When shown on a graph, the voltage drop curve was similar to that of the alkaline cell.

キーワード：乾電池、消耗、電圧低下

I. はじめに

筆者は小学校教員養成課程の「理科」や「理科教育法」などを担当しているが、それらの授業の中で乾電池と豆電球をつないだときの電圧と電流を測定したり、それらの測定値からオームの法則を用いて豆電球の抵抗の大きさを求めたりする実験を行っている。

内容的には中学校程度のレベルであるが、電圧計や電流計の扱い方に慣れる、あるいはオームの法則を思い出すのにちょうど良い課題で、受講生らも結構楽しみながら実験しているようである。彼らの大部分は電圧計や電流計を小学校や中学校でほんの数回扱ったくらいの経験しかないので、配線の仕方や目盛の読み方などを試行錯誤しながら、それでも一応は何とか正しく操作できるようになり、授業の目的はある程度達成できているように感じている。

ところで昨年の『論究』では、豆電球の抵抗値がフィラメントの温度によって異なることを実験によって確かめた結果を報告した。同じ豆電球の抵抗値をテスターで測定した場合は約1Ωであるが、乾電池を1個つないで点灯させたときの抵抗値は約4

Ω、乾電池を2個直列につないだときの豆電球の抵抗値は約6Ω、3個の乾電池を直列につないだときは約8Ωになることを報告した。一般に、金属は、温度が低いほど電気抵抗が小さく、温度が高くなるほど電気抵抗が大きくなるからである。

本研究ではマンガン乾電池、アルカリ乾電池、充電式のニッケル水素乾電池、リチウム乾電池の4種類の乾電池を用いて、それらを使用し続けたときの電圧の変化を調べたところ、乾電池の種類によって大きな違いがあることが分かったので、それらの結果について報告する。

II. 本研究の目的

ふだんの授業では充電式のニッケル水素乾電池を使用しているが、たまたまテスターで豆電球の抵抗値を測定することになり、テスターと一緒に梱包されていた付属のマンガン乾電池を挿入して用いた。テスターで抵抗を測定するとき、最初にテスターのプラス極とマイナス極のテストプロッド（金属棒の端子）を接触させてゼロオーム調整という操作をしなければならぬ。スイッチを入れてゼロオーム調整をしようとしたが、いくらゼロオームアジャスト

* Hitoshi IGASHIRA 教育学部 理科、理科教育法、生活と科学

ボリウムを回しても、針が左右に揺れてゼロオーム調整ができない状態を示した。5～6分経つと針が少し落ち着いてきたが、アジャストする度に針の位置がずれ、何度もやり直さなければならなかった。

最終的にテスターの指針が落ち着いて測定可能となったのは、スイッチを入れてから10分以上も経過してからのことであった。また、使用したテスターでは、1.5V用の豆電球の抵抗値が小さ過ぎて正確に測定できなかった。測定をくり返す度に0.7Ωから1.3Ωくらいまでの誤差が生じた。

筆者はこれまでにテスターを使った経験がほとんどなかったため、スイッチを入れたときのテスターがどうして、あのように不安定であるのかという疑問が湧いてきたのである。

これらの原因としては乾電池の接触不良、テスターの機器の不良、乾電池自体の不安定さなどが考えられた。自動車のエンジンの暖機運転のように、テスターにも慣らし運転が必要であるのかなどという考えあぐねた末、どうやら使用したマンガン乾電池の不安定さが主な原因であるのではないかという結論に至った。というのは、使ったマンガン乾電池の電圧を測定すると、最初は0.97V以上を示したが、豆電球につながると直ぐに0.80V以下に下がってしまったからである。

そこで、新しいマンガン乾電池を使い始めたとき電池の電圧や電流がどのような変化を示すのか、あるいは使用し続けたとき電池がどのような経過を経て消耗していくのかを実験によって実際に確かめてみたいと考えたのである。また、マンガン乾電池以外にも新しいタイプの乾電池が次々と開発され、様々な機器に使われているが、それらの乾電池の基本的な原理や構造の違い、性能の違いなどについて大まかに調べてまとめ、それらの結果について理科や理科教育法などの授業に生かしたいと考えたのである。

Ⅲ. 乾電池の基本的な知識

電池の消耗実験に入る前に、乾電池の基本的な構造と原理、および乾電池の種類の違いについて簡単に解説しておく。

1. ボルタの電池

乾電池の基本的な原理を説明するには、最初に作

られたボルタの電池が最も分かりやすい。1799年、イタリアの物理学者ボルタ (Volta, Alessandro 1745-1827) は、銅板と亜鉛板を希硫酸液に浸し、両者を導線でつなぐと電気が流れることを発見した。彼はこれらの功績によって、後に近代電気学の祖と称せられるようになった。この時、銅板側をプラス極、亜鉛板側をマイナス極として、電流はプラス極からマイナス極に流れると決めたのである。

ボルタの電池原理を説明すると、銅よりも亜鉛のほうがイオン化傾向が大きいので、亜鉛が Zn^{2+} と $2e^-$ に分かれて溶けていく。亜鉛版に蓄積された電子は導線を伝わって、銅板のほうに移動していく。銅の表面では $2e^-$ と水素イオン ($2H^+$) が反応して水素ガス (H_2) が発生する。このようにイオン化傾向の違う2種類の金属を酸や塩の電解液に浸し、導線でつなぐと電池ができる。

ボルタの電池では約1.1Vの起電力を生じるが、銅板側に発生する水素の気泡が銅板の表面を被って反応を阻害し、起電力はすぐに低下してしまう。その後、重クロム酸カリウムなどの酸化剤を添加して水素ガスの発生を抑制する方法が考案され、実用的なバッテリーが作られるようになった。

2. 乾電池の種類と特徴

その後、液が漏れ出さないようにして小型軽量化を図り、持ち運びに便利なマンガン乾電池が開発され、乾電池が我々の日常生活に普及していったのである。現在ではマンガン乾電池よりも起電力が大きく、より長時間使用可能な乾電池が次々と開発され、ノートパソコン、スマートフォン、タブレット、掃除機など用途に応じた乾電池がそれぞれある。

電池の中でもマンガン乾電池のように使い捨てタイプのものを一次電池、ニッケル水素乾電池のよう

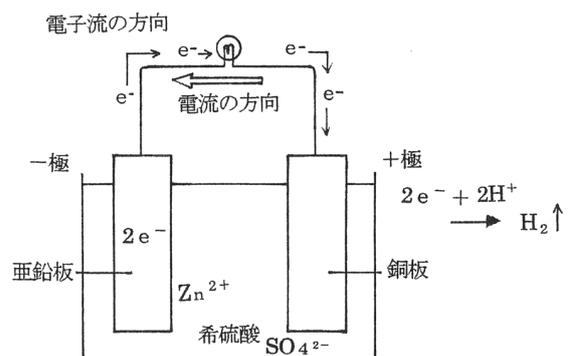


図1. ボルタの電池

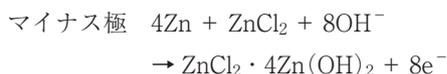
に充電式のを二次電池と呼んでいる。

(1) マンガン乾電池 (塩化亜鉛乾電池)

二酸化マンガン電池の起電力は約1.5Vである。亜鉛の筒を容器として用い、これがマイナス極となる。筒の外側の側面は金属ジャケットで被ったり、プラスチック膜や樹脂塗料などの絶縁膜でコーティングされ、製品名などが印刷してある。

中央がボタン状に飛び出たプラス極の下には炭素棒が埋め込まれている。プラス極側は、炭素棒のように電気を通すものであれば、金属でなくてもよい。炭素棒の周囲には二酸化マンガン、塩化亜鉛、少量の塩化アンモニウム、黒鉛の粉末を水で練ったもので満たされ、その外側を濃厚な塩化亜鉛溶液 (弱酸性) と少量の塩化アンモニウム溶液 (中性) を染み込ませた綿 (あるいは厚紙) などが被って、亜鉛の筒と接している。

マイナス極では亜鉛が Zn^{2+} と $2e^{-}$ に分離し、亜鉛が塩化亜鉛溶液中に溶け出し、電子が亜鉛容器に蓄積する。溶け出した亜鉛イオンは、溶液中の水酸イオンと反応して、 $Zn(OH)_2$ になるので、亜鉛イオンがマイナス極付近から除かれ、亜鉛が溶け続けることが可能となり、電池の起電力が低下することを防いでいる。



マイナス極の亜鉛筒に蓄積した電子は、導線を通してプラス極の炭素棒に移動する。炭素棒の表面

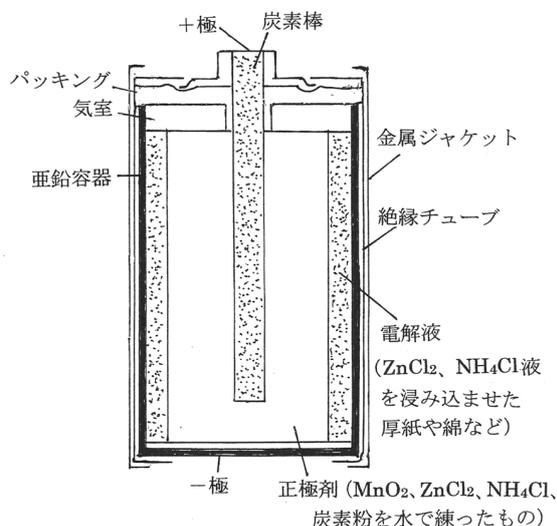
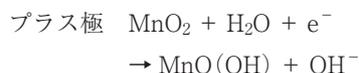


図2. マンガン乾電池

では、移動してきた電子と溶液中の水素イオンが反応して水素分子ができる場所であるが、二酸化マンガン (MnO_2)、水、電子が反応して $MnO(OH)$ と OH^{-} になるので、水素の気泡が炭素棒の表面を被ってしまうようなことはない。



ここでは電池内の成分や反応をできるだけ簡略して述べたが、実際には性能を向上させるために様々な成分が添加され、化学反応ももっと複雑な変化が起こっている。一般に乾電池と呼ばれているが、反応が起こっている乾電池の中身をみると乾 (dry) ではなく、湿 (wet) である。

(2) アルカリ乾電池

アルカリ乾電池は筒状の容器がプラス極で、中心の集電体の真ちゅうの棒がマイナス極に接続されている。集電体の周りの電解液は強いアルカリ性の水酸化カリウム溶液からなり、粉末の亜鉛が混ざっている。電解液は、液漏れを防ぐためにゼリー状に固められている。

強アルカリ性の電解液は、亜鉛 (Zn) を強制的に溶かして電子を放出させる。粉末状の亜鉛は表面積が大きく、反応性が高い。放出された電子は集電体に集められ、マイナス極に蓄積される。プラス極とマイナス極が導線でつながれると、電子は導線を通してプラス極に移動して、二酸化マンガン、水と反応して、三酸化二マンガンと水酸基になる。

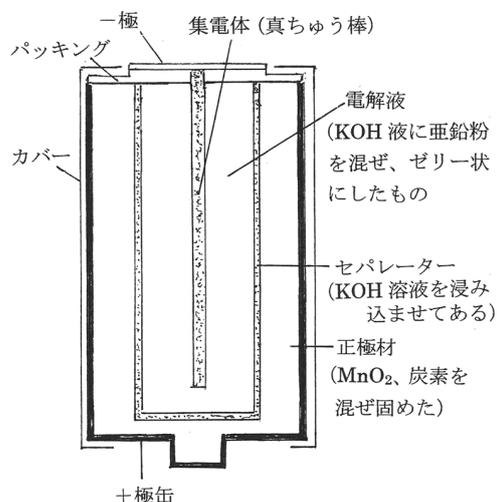


図3. アルカリ乾電池



このようなアルカリ乾電池はマンガン乾電池に比べて高いエネルギー密度をもち、適正な使用条件下ではマンガン乾電池の5～10倍の長時間、持続させることができる。

(3) ニッケル水素乾電池

ニッケル水素乾電池のように、充電してくり返し使用できるタイプの電池を二次電池という。

ニッケル水素電池は、電解液を染み込ませたセパレーターで仕切られた正極板と負極板を渦巻き状または同心円状に重ねて小型化し、スチール製の筒に収められている。この筒はマイナス極の端子を兼ねている。正極板はプラス極の端子に、負極板はマイナス極の端子に、それぞれ接続されている。正極端子と負極端子はプラスチック製のガスケットで絶縁されている。正極板は水酸化ニッケルなどニッケル酸化化合物で、負極板は水素吸蔵合金でできている。

放電時、負極側では水素吸蔵合金から遊離した水素が水酸化イオンと反応して、水と電子が生成される。この電子がマイナス極に蓄積される。電子は負極側から正極側に移動して、オキシ水酸化ニッケルと水が電子を受け取り、水酸化ニッケルと水酸化イオンができる。

充電時は、それぞれ逆の反応が起きて、元の状態に戻る。

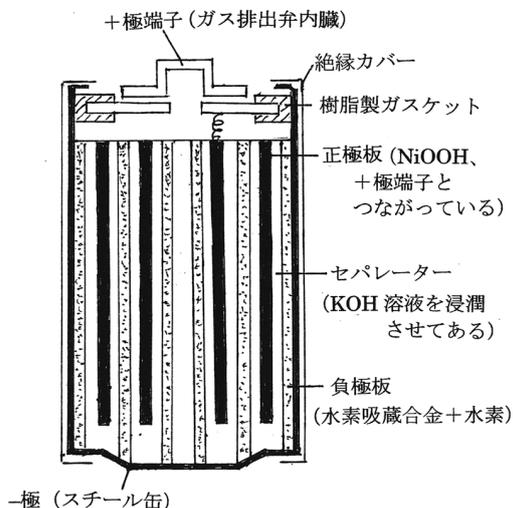
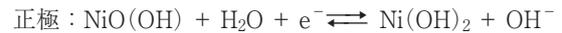
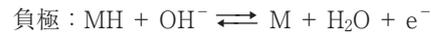


図4. ニッケル水素乾電池



(M: 水素吸蔵合金)

様々な改良がなされ優れた製品が開発された結果、電気容量が大きい、くり返し使用できるので経済的である、安全性が高い、単純な回路で充電放電が可能である、内部抵抗が小さいので高圧電が長時間維持できるようになって、広く普及するようになった。サンヨー電気のエネループは初めて充電した状態で販売されたが、自己放電が小さく5年後でも直ぐ使用できる。トヨタのハイブリッド車に使用されたバッテリーは、ニッケル水素乾電池であった。

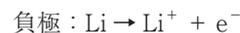
加熱したり過放電したりすると水素ガスを発生したり、メモリー効果が多少あり、使用をくり返しているうちに徐々に電気容量が低下するなどの短所がある。

負極板にカドミウム化合物を用いたニッケルカドミウム乾電池があるが、使用途中で充電をすると電気容量が小さくなる(メモリー効果)、カドミウム汚染などの問題から、減衰していった。

(4) リチウム乾電池(一次電池)

リチウム電池といえばリチウムイオン電池など充電式の二次電池が代表的であるが、ここでは一次電池のリチウム電池について述べる。

用途に応じて様々な種類が開発されているが、代表的なものとしては、正極に二酸化マンガン、負極にリチウムを用いたマンガンリチウム電池がある。リチウムだけでは反応性が強過ぎるので、アルミニウムを混ぜた合金を使用しているものが多い。電圧は約3.0V。



リチウムは金属の中で最もイオン化傾向が大きい

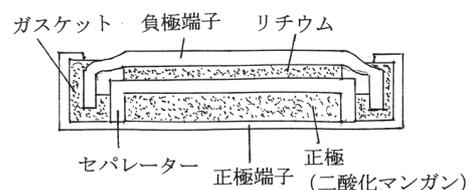


図5. ボタン型のリチウムマンガン乾電池

く、乾電池にリチウムを使うと高電圧が得られ、電力容量もマンガン乾電池の約10倍で、寿命が長い。リチウムは亜鉛よりも軽いので、マンガン乾電池やアルカリ乾電池よりも軽量化することができる、放電末期まで電圧降下が小さい、マイナス40℃の低温下でも使用可能であるなどの長所があり、用途が広い。腕時計、体温計など小型で少量の電流で済むような機器にはボタン型のマンガンリチウム乾電池が使用されている。型番 CR2032 の C は正極に二酸化マンガンを使用したタイプのものであることを示している。20は直径20mm、高さ3.2mm を表している。マンガンリチウム電池は1個で3.0V の出力があり、約2V 必要なLED を用いた機器用としても都合がよい。

リチウムは水と混ざると激しく反応して水素を放出するので、電解液として水溶液を使用することができない。そこで、プロピレンカーボネイトなどの有機溶媒にリチウム塩を溶かしたものを電解液として使用している。有機溶媒を使うとイオンの移動速度が遅くなるので、大電流放電に向かない。

正極に硫化鉄を用いた硫化鉄リチウム乾電池は電圧が1.5V で、従来の乾電池と互換性があるので、単3や単4型の硫化鉄リチウム乾電池が用いられている。

(5) リチウムイオン蓄電池 (二次電池)

今回の実験では使用しなかったが、現在最も注目されている電池のひとつであるリチウムイオン電池について簡単に触れておくことにする。基本原理としては、リチウムイオンが電解液を介して正極と負極を行き来することで充放電をくり返す。

構造的にはニッケル水素乾電池とよく似ている。正極の素材は酸化コバルトリチウムなどリチウム金属酸化物が主流となってきており、これをアルミ箔に塗布して用いる。負極にはグラファイトなどの炭素系素材を銅箔に塗布して用いる。セパレーターとしては多孔質の絶縁フィルムが使用される。これら3種類のフィルムを層状に重ねたものを巻いて、ニッケルメッキしたスチール缶に詰め、電解液を注いで封入する。電解液は炭酸エチレンや炭酸エチルメチルなどの有機溶媒にリチウム塩を溶かしたものをを用いる。水溶液の場合、電気分解を起こして水素と酸素を生じるからである。

放電の時は、炭素結晶層のリチウムイオンが電解

液中に溶け出して、正極の結晶構造の中にとり込まれる。反対に充電の時は、正極の結晶構造からリチウムイオンが電解液中に溶け出して、負極の炭素結晶層の中にとり込まれる。



大容量の電力を充放電することができる、メモリ効果がないのでいつでも充電が可能である、軽いなどの長所があり、携帯用のパソコンやスマートフォン、掃除ロボット、電動自転車、ハイブリッド自動車など様々なものに使用されている。最近では大型のジェット機に採用され、話題となった。

しかし、材料のリチウムが高価（価格の約7割を占める）であることから単価が高い、充電時の電圧制御がうまくいかないと膨張、発熱、発火の恐れがあり、強い衝撃に弱いなどの短所がある。

IV. 乾電池の消耗実験

4種類の乾電池が働き続ける時間を比較するために、それぞれの乾電池に1.5V 用の豆電球をつないで点灯させ、豆電球が点灯し続ける時間を測定した。また、そのときの電圧と電流の変化を測定することによって、時間とともに乾電池がどのような経過をたどって消耗していくのか詳細に調べてみた。

1. 実験方法

(1) 使用した機器は次の通り

- ・電圧計、電流計：小学校教材用、内田
- ・豆電球（1.5V、0.3A 用、ナリカ）
- ・テスター（KF-20、カイセ）
- ・マンガン乾電池（単3、1.5V パナソニック）
- ・アルカリ乾電池（単3、1.5V パナソニック）
- ・充電式ニッケル水素乾電池（単3、1.5V、エネロープ、サンヨー）
- ・リチウム乾電池（単3、1.5V、パナソニック）

(2) 消耗実験の方法

- ①豆電球を点灯させる前に、乾電池の電圧を測定する。
- ②乾電池に豆電球、電圧計、電流計をつないで回路を作る（図6）。
- ③豆電球を点灯させ続けたときの電圧、電流の変化を測定して記録する。

2. 結果

(1) マンガン乾電池の場合

図7の●は、マンガン乾電池を豆電球につないで灯し続けたときの電圧の変化を示したものである。スイッチを入れる前に、使用するマンガン乾電池の電圧を測定すると1.5Vよりも高い1.67Vを示した。次にスイッチを入れて電流が流れる状態にしたところ、スイッチを入れると同時に電圧は1.30Vに低下した。なお、その時の電流は0.30Aであった。

スイッチを入れてから最初の10~15分間は、電圧がかなり急速に低下するが、その後は低下速度がやや緩やかになり、だだららと電圧の降下が続いた。

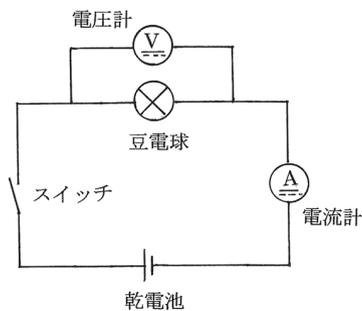


図6. 乾電池に豆電球、電圧計、電流計をつないだ回路図

この間、豆電球の明るさは次第に暗くなっていく。

2時間20分後には電圧が約0.5Vにまで下がるが、この頃になると部屋の照明を消して暗くした状態で豆電球のフィラメントが赤く灯っているのが確認できる程度である。それ以降は、電球の点灯が目で確認することができなくなる。

2時間30分以降、電圧の低下速度がやや速くなり、3時間後には電圧は0.1V以下となり、それ以降の電圧の変化は非常に緩慢である。5時間と10分で測定を停止したが、そのときの電圧は0.03Vであった。

電圧と同時に電流も測定したので、その結果を同じ図7の○で示した。電流の目盛りは、右側の縦軸に表してある。電流の変化は電圧の変化と非常によく似たパターンを示している。前半はなだらかに減少し、2時間40分を過ぎた頃から急勾配となり、4時間を過ぎると減少の速度は緩やかとなる。

電圧と電流が分ればオームの法則の式を使って豆電球の抵抗値が計算できるので、その結果を図8に示した。豆電球の抵抗値は、時間とともに4Ωから徐々に小さくなって、2時間20分後には約2Ωに半減している。その後、やや急激に1Ω前後にまで下がって、その後はほぼ横ばいとなる。

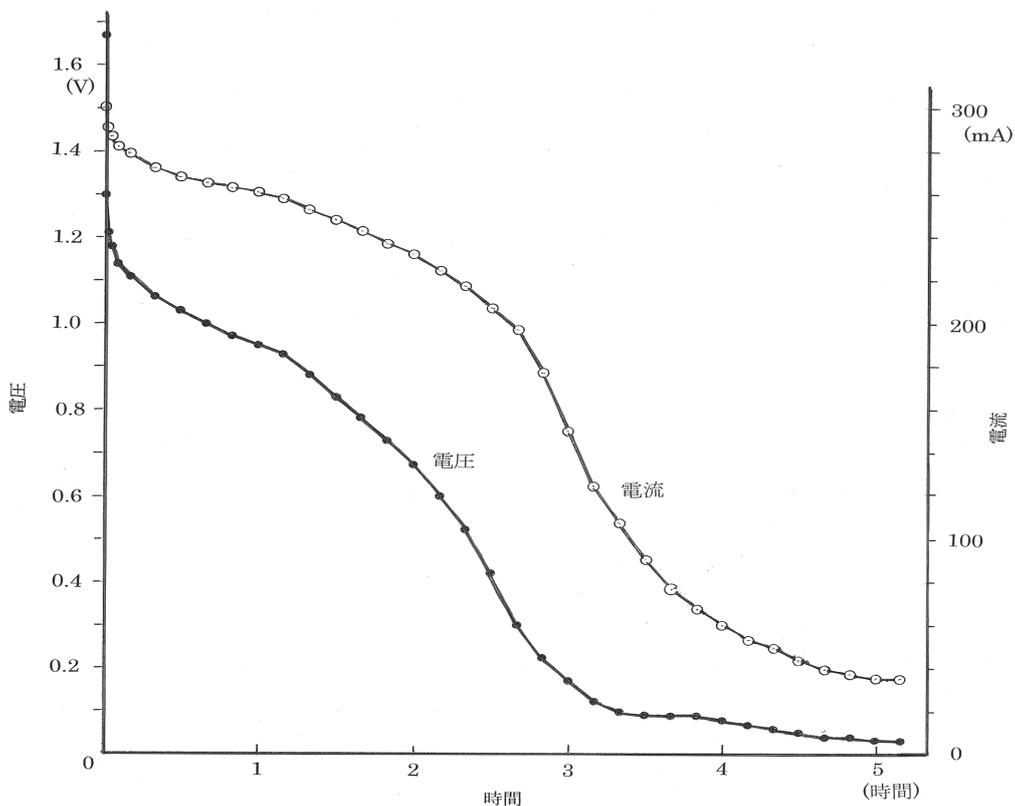


図7. マンガン乾電池に豆電球を繋いだときの電圧・電流の変化

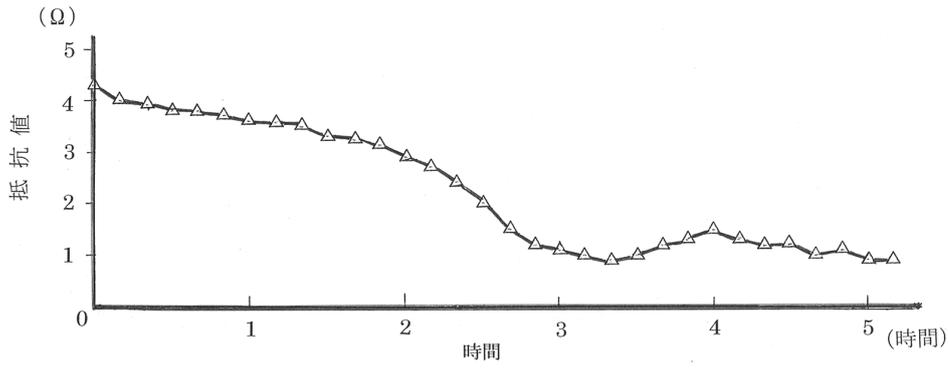


図8. 豆電球の抵抗値の変化

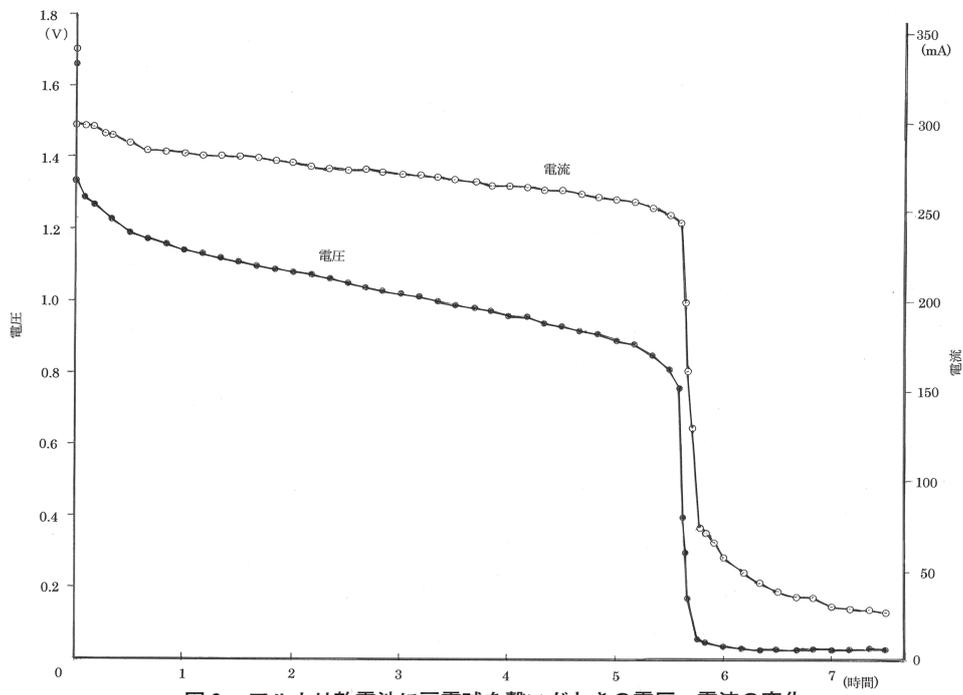


図9. アルカリ乾電池に豆電球を繋いだときの電圧・電流の変化

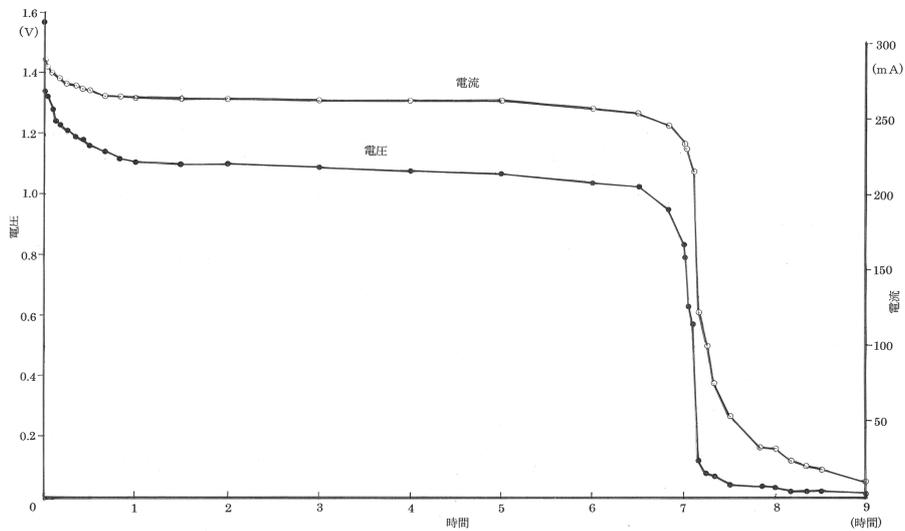


図10. ニッケル水素乾電池を豆電球に繋いだときの電圧・電流の変化

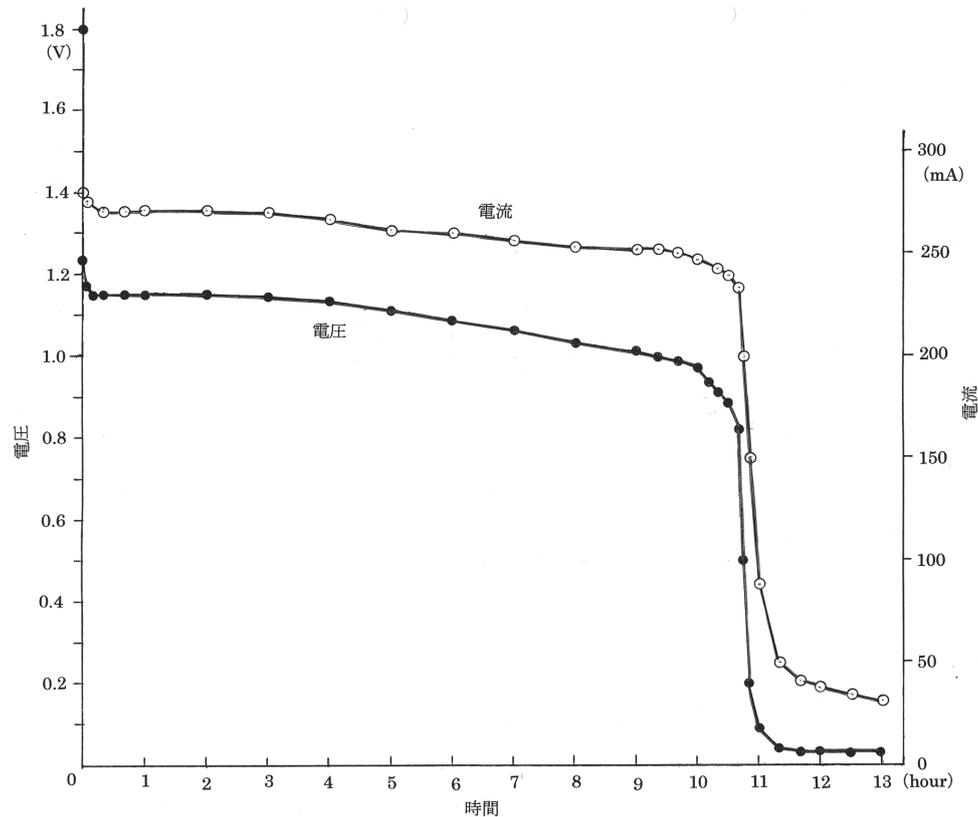


図11. リチウム乾電池（一次電池）の場合

(2) アルカリ乾電池の場合

同様に単3のアルカリ乾電池を豆電球につないで点灯し続けたときの電圧、電流の変化を測定した。結果を図9に示す。

使用前のアルカリ乾電池の電圧は1.66Vを示したが、豆電球に繋ぐと同時に1.32Vに低下した。使用を開始してから約30分間は1.2Vまで比較的速やかに低下するが、その後は電圧の低下速度はかなり緩やかである。

しかし5時間30分を超えた途端に、電圧が10分間の間に0.8Vから0.17Vまで一気に降下した。

(3) ニッケル水素乾電池の場合

アルカリ乾電池と同様の変化が見られるが、ニッケル水素乾電池の場合（図10）は放電末期まで電圧降下が少なく、豆電球を点灯させてから6時間30分間、電圧は1V以上を保っている。しかし、6時間40分を経過した頃、電圧は急降下を始め、7時間と10分後には約0.1Vに低下した。電流も同様の变化を示している。

(4) リチウム乾電池（一次乾電池）

1.5Vの乾電池と互換性のある硫化鉄リチウム乾電池の結果を図11に示す。初期電圧は1.80Vで、アルカリ乾電池とほぼ等しい。電球につなぐと同時に電圧は1.23Vを示し、最初の後数分間で約1.15Vになるが、その後の約3時間は電圧がほとんど変化しない。電圧低下の様子はニッケル水素乾電池とよく似た曲線であるが、耐久時間は3時間半以上も長い。

V. 考察

1. 耐久時間

4種類の乾電池を使用し続けたときの電圧の変化を図7、図9、図10、図11に示したが、時間と電圧の座標軸の縮尺がそれぞれバラバラになっており、比較するのが難しい。そこで4種類の乾電池の性能を比較しやすいように、縦軸の電圧と横軸の時間を共通にして図12に示した。これを見ると、技術の進歩によって乾電池の性能が非常によくなっていることが一目瞭然である。

マンガン乾電池の場合、1.5V用の豆電球につないだ当初、電流は約280mA流れているが、これは

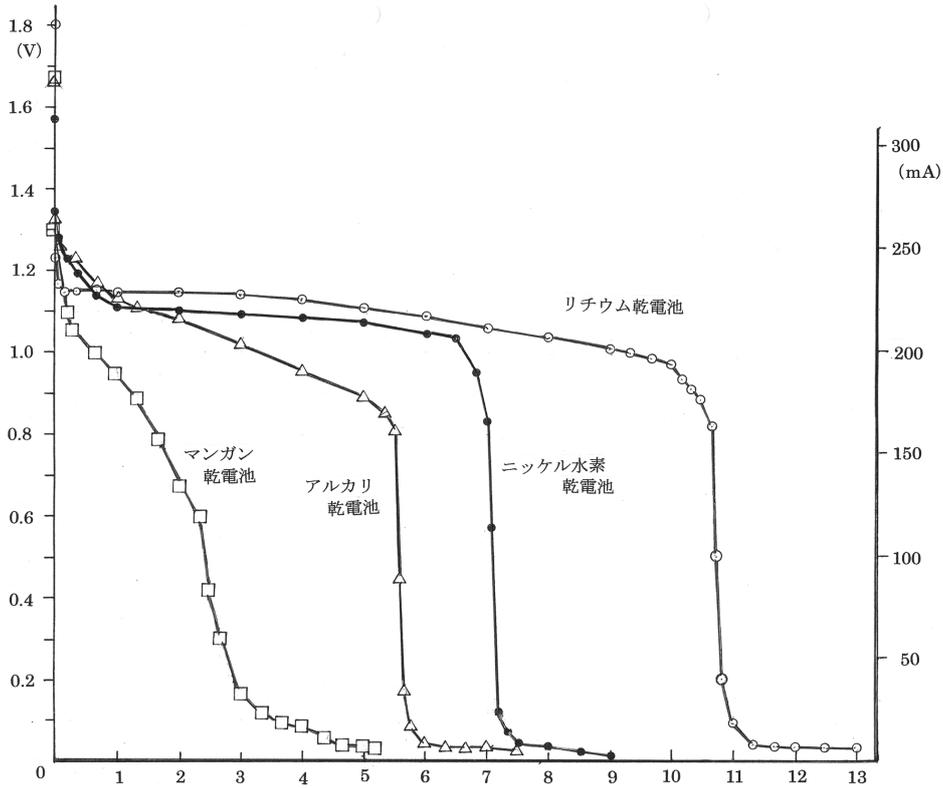


図12. 4種類の乾電池の電圧低下の比較

□：マンガン乾電池 △：アルカリ乾電池 ・：充電式ニッケル水素乾電池 ○：リチウム乾電池（一次乾電池）

マンガン乾電池にとってかなりの負荷であると思われる。いわば、半分ショートしているような状態である。この結果、時間とともに電圧はかなりのスピードで降下し始め、30分を経過した頃には約1.0V程度まで下がっている。

アルカリ乾電池は強アルカリ性水溶液を使って亜鉛を強制的に溶かし、電子を取り出している。亜鉛は粉末にして表面積を増大させ、反応性をさらに高めている。その結果、電圧降下は比較的緩やかで、4時間50分経過しても約0.9V以上を維持している。但し、液漏れを起こした場合、機器の故障や皮膚に触れたりすると危険である。

充電式のニッケル水素乾電池は耐久時間が長いうえで電圧降下が少なく、放電末期まで高い電圧を保ち続けることができる。やや値段が高いが、充電が2,000回以上も可能であり、経済性も優れている。

硫化鉄リチウム乾電池の耐久時間と電圧降下などの点において、最も優れているという結果が得られた。但し、初期電圧が1.8V以上あり、他のものに比べて値段が高い。

2. 乾電池の特徴と用途

今回の結果より、安定性と耐久性を求めて進められてきた乾電池の技術の進歩が伺える。乾電池を使用する場合、それぞれの乾電池の性質を理解したうえで、それぞれに適した用途や使い方をしておく必要がある。マンガン乾電池は負荷電流が少ない電卓、時計、リモコン、携帯ラジオなどの機器に適している。また、使用を中止すると電圧がある程度回復するなどの特徴を生かして、非常用の懐中電灯などにも適している。

表1. 3種類の乾電池の比較

種類	耐久時間 (0.9V以上)	重量 (g)	特徴
マンガン乾電池	1時間10分	18.0	電気容量少ない、耐久時間短い、安価、長く放置すると液漏れの可能性
アルカリ乾電池	5時間0分	23.1	耐久時間長い、電圧降下比較的少ない。
ニッケル水素乾電池	6時間50分	25.8	充電式、耐久時間長い、放電末期まで電圧降下少ない
リチウム乾電池	10時間20分	14.6	単価高い、低温下でも使用可能、軽い、放電末期まで電圧降下少ない

一方、オーディオ機器やフラッシュ付きカメラ、同じ時計でも温度や湿度などを液晶画面で表示するような多機能を備えた電波時計などは負荷電流が増えるため、アルカリ乾電池やニッケル水素乾電池などのほうが適しているだろう。スキーや登山などで使用するときには、軽くて寒さに強いリチウム乾電池がお奨めである。さらに、負荷電流が大きいため常に充電をくり返して使用しなければならないビデオカメラ、ノートパソコン、スマートフォン、掃除機、電動自転車などの場合、充電式のニッケル水素乾電池やリチウムイオン電池が適している。

反対に、負荷電流が小さい時計などにニッケル水素電池やリチウム電池を使用した場合、同じ電池を何年間も入れた状態が続いて金属カバーが錆びても気づかないで故障の原因になることがある。電池の交換をしないときでも定期的な点検をする必要がある。

身近な乾電池ではあるが充電式ではない乾電池を充電したり、新しいものと消耗したものを直列につないだり、種類の異なったものを混用したりするなど誤った使い方をすると、発熱や発火、液漏れなどを起こして危険な場合がある。また、湿気や強い衝撃なども故障の原因となることがあるので、使用上の注意事項を守って安全に使用することが大切である。

主な参考文献

- ・井頭均 2014 豆電球の抵抗値 教育学論究第6号 関西学院大学教育学会。
- ・小林正光・野村裕次郎著 1991 新化学 数研出版。
- ・菊池誠 1993 電気のしくみ小事典 講談社。
- ・藤瀧和弘 2012 電気の仕組みと基本 秀和システム。
- ・松重和美監修 2004 ナノテクノロジーの世界 数研出版。
- ・室岡義広 1992 電気とは何か 講談社。
- ・望月傳 2000 電気の極意 技術評論社。
- ・山村等 1976 化学Ⅱ 第一学習社。
- ・涌井良幸 1994 電気とメカ 日本実業出版。