

# 小中学校理科における電池のショート回路の危険性

## －実験中に起こりうるショート回路の危険性に関する定量的評価－

本田 泰基\*・重松 宏武

The Risk of a Battery Short Circuit in Elementary and Junior High School Science Classes:  
－ Quantitative Assessment of Short Circuit Risks in Science Class Experiments －

HONDA Taiki\*, SHIGEMATSU Hirotake

(Received September 24, 2021)

### はじめに

乾電池を用いた理科の学習は、小学校第三学年理科『電気の通り道』の単元において始めて行われる。具体的には、「あかりがつくつなぎ方とつかないつなぎ方（電気を通すつなぎ方と電気を通さないつなぎ方）があること」を学習するために、豆電球と乾電池を用いて実験を行う。小学校学習指導要領解説（文部科学省、2017）においては教師向けに「豆電球などは使わずに、乾電池の二つの極を直接導線でつなぐことのないようにするなど、安全に配慮するように指導する」と記載されており、同時に各社検定教科書においても「乾電池が熱くなるので乾電池に導線だけをつないではいけない」と明記されている（養老ほか、2019）。この行為は理科の単元に限らず一般的に危険な行為であり、乾電池のプラス極とマイナス極の間に抵抗となる豆電球やモーターをつなぐに、導線などで直接結ばれた回路はショート回路と呼ばれている。または「短絡」とも呼ばれている（神野、2019）。

この乾電池によるショート回路は小学校理科のみならず、中学校理科「電流のはたらき」の単元を始め、乾電池を用いた実験を行う単元全てにおいて起こる可能性がある。当然のことながら、指導する教員並びに実験を行う児童・生徒も注意を払いながら実施しているが、誤った回路を組んだことによる短絡、または無意識のうちに短絡が起こる可能性は十二分にある。なお、ショート回路が危険な理由として、①「ジュール熱によって発熱した乾電池に触れることにより火傷を負う可能性がある」、②「アルカリ乾電池や充電池のように内部抵抗が小さく、発熱の激しい電池においては破裂・火花の飛散、または電池内部にある電解液が外へ流れ出る（液漏れ）可能性

がある」、③「過電流により電流計や電圧計といった接続された測定器具が破損する可能性がある」ことなどが挙げられる（霜田ほか、2016；東京書籍、2016；養老ほか、2019）。

電池を製造する各メーカーは電池が短絡（ショート）してしまっても基準以上の安全性があることを証明する認証試験（外部短絡試験等）を行っており、さらに独立行政法人国民生活センターなどの外部機関による検証も行われている（独立行政法人国民生活センター、2018a）。しかし、著者らが調べた範囲においては、電池の発熱温度（最高温度）や危険性に関する注意喚起の情報は存在するものの、試験・検証に関する詳細な定量的評価の一般公開は確認されず、教育現場においては具体的な危険度に関する認知は十分にはなされていない。

そこで、学校の教育現場を想定したショート回路を意図的に組み、乾電池または充電池本体の温度の時間変化並びに物理的变化（破裂、液漏れ等）を測定・観測することにより、ショート回路の危険性を定量的に評価することを試みた。

### 1. ショート回路におけるオームの法則

始めに、イメージ理解としてショート回路の危険性を数式を用いて半定量的に評価を行う。単純な電気回路として電池の起電力  $E$ 、主抵抗の抵抗  $R$ 、電池の内部抵抗  $r$  からなる回路を考える（図1(a)）。この回路（主抵抗）に流れる電流  $I_a$  と主抵抗の消費電力  $P_a$ 、内部抵抗の消費電力  $P_a'$  はそれぞれ、

$$I_a = \frac{E}{R+r}, \quad P_a = \frac{RE^2}{(R+r)^2}, \quad P_a' = \frac{rE^2}{(R+r)^2} \quad (1)$$

\* イワタニ山陽株式会社

と導かれる。続いてショート回路を検討する。大きくは2つのケースが考えられ、一方は「主抵抗はきちんと接続されているが、なにかしらの理由で別経路によって短絡する場合（図1(b)）」であり、もう一方は「そもそも主抵抗が接続されずに短絡する場合（図1(c)）」である（霜田ほか、2016）。(b)、(c)両図の回路において主抵抗に電流が流れることは無く、電池の内部抵抗に全ての電圧がかかることとなる。具体的にこれらの回路（内部抵抗）に流れる電流  $I_b, I_c$ 、主抵抗の消費電力  $P_b, P_c$ 、内部抵抗の消費電力  $P_b', P_c'$  はそれぞれ、

$$I_b = I_c = \frac{E}{r}, \quad P_b = P_c = 0, \quad P_b' = P_c' = \frac{E^2}{r} \quad (2)$$

と表される。なお、本論文「はじめに」の章において、指導書等（文部科学省、2017）における表現を採用して「豆電球は使わないで」及び「豆電球やモーターをつなぐ」という主抵抗が接続されないことを前提とした表現を用いたが、現実問題として図1(b)のように主抵抗を接続した回路においても短絡が起こる可能性があるため注意が必要である（霜田ほか、2016）。

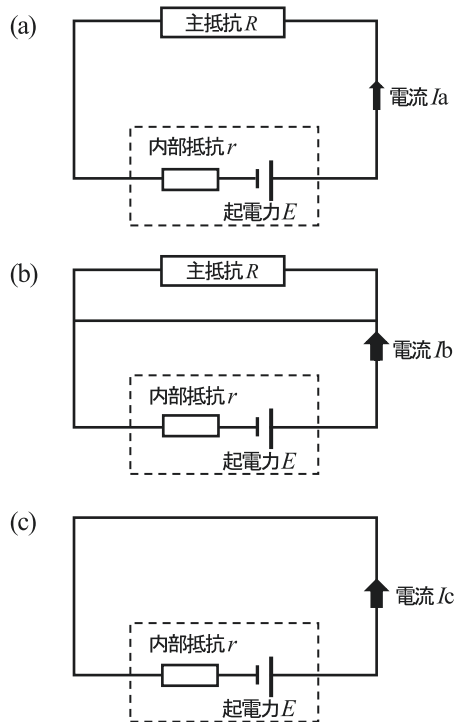


図1. 電池の起電力  $E$ 、主抵抗の抵抗  $R$ 、電池の内部抵抗  $r$  からなる電気回路 ((a)：基本回路、(b)：別経路によって短絡する場合、(c)：主抵抗が接続されずに短絡する場合)

ここで、電池の起電力  $E = 1.5 \text{ V}$ 、モーターまたは豆電球を想定した主抵抗の抵抗  $R = 5 \ \Omega$ 、電池の内部抵抗  $r = 0.3 \ \Omega$  と仮定し（重松ほか、2016；千々松ほか、2021）、(1)式及び(2)式を用いて具体的な検討を行う。流れる電流はそれぞれ  $I_a \cong 0.28 \text{ A}$ 、 $I_b = I_c = 5.0 \text{ A}$ 、消

費電力はそれぞれ  $P_a \cong 0.40 \text{ W}$ 、 $P_a' \cong 0.024 \text{ W}$ 、 $P_b' \cong P_c' \cong 7.5 \text{ W}$  という結果を得る。このことはショート回路による大幅な電流増加（約18倍）に伴い、内部抵抗における消費電力も急激に増加（約310倍）することを意味する。もちろんこれは単純なモデルであり、現実的には例えば抵抗に注目すると、配線の抵抗や接触抵抗などの影響も受け、さらに内部抵抗もそれぞれ電池の種類（アルカリ等）や状態（新旧）によって異なることから(1)、(2)式のような単純な式で表すことはできない。しかし、これらの影響を考慮しなくとも電流及び消費電力の大幅な増加は予想されることからショート回路に危険性が潜むことは容易に理解することができる。

## 2. 使用する電池の基礎情報

### 2-1 小・中学校で用いられている電池の種類

特定の中学校教師用指導書において「電池をショートさせると危険である。特に内部抵抗の小さい電池（アルカリ電池や充電電池）では、火花が散ったり、発火したりする。」と電池の種類について言及した内容が記載されている（東京書籍、2016）。このことはアルカリ乾電池・充電電池の危険性を記し、暗に内部抵抗の大きいマンガン乾電池を推奨しているとも読み取れる。また、教育業界でよく活用されている電池を用いる教材においては明確に「乾電池は必ずマンガン乾電池をお使いください。」と記載されている<sup>1)</sup>。

しかし、現在出版されている小中学校理科の検定教科書の多くは該当単元において「乾電池」と表記されており、具体的な種類に関する明言は避けている。そこで、現状把握のために小学校または中学校に勤務する山口大学（教育学部理科教育選修）の卒業生を中心に現状調査（乾電池の種類とその選択理由）を行った。小学校4校、中学校7校から回答を得、その結果を電池の種類ごとに以下に示す（カッコの中の数字は回答数を表す）。

#### 【用いられている電池の種類とその選択理由】

- マンガン乾電池を採用（小学校2校、中学校2校）
  - ・液漏れした場合に安全であるから（1）
  - ・直列・並列を理解するために高出力である必要がないから（2）
  - ・安価であるから（1）
- アルカリ乾電池を採用（小学校1校、中学校5校）
  - ・高出力で結果が安定（2）
  - ・学校に備蓄されている（5）
- 充電電池（ニッケル水素電池）を採用（小学校1校）
  - ・経済性を考慮して（1）

予想に反してマンガン乾電池よりアルカリ乾電池が多く使用されており、さらに充電電池を活用している学校も存在することが明らかとなった。また、多くの教員が電池の種類を自己選択したのではなく、学校に備蓄されているものをそのまま使用しており、電池の選択に注意を払っていないということも明らかとなった。なお、中学校1校においては直流電源を主に使用し、電池の使用頻度は低いという回答もあり、中学校においてはそもそも電池の利用頻度が低いことが電池の種類への注意がなされていない要因の1つであると予想する。

以上の結果から小中学校での使用が確認されたマンガン乾電池、アルカリ乾電池、充電電池（ニッケル水素電池）を本研究の調査対象に採用し、ショート回路の危険性を定量的に評価することを試みた。特に充電電池は繰り返し使用できることから、使い捨ての電池よりも経済的で環境に優しいエネルギーとして注目されており、今後、小中学校における普及が進むことが期待されている。また、他の電池に比べ、内部抵抗が小さく危険性が高いと予想されることから充電電池を実験対象にする意義は高いと考えた。

## 2-2 採用した電池の基礎物性

2-1節で述べた教育現場における活用状況を踏まえ、①：マンガン乾電池、②：アルカリ乾電池、③：高品質アルカリ乾電池、④：充電電池（ニッケル水素電池）の4種類を調査対象に採用した。ここで③の高品質アルカリ乾電池とは、従来に比べ、長持ち性能向上や過放電後のガス発生率が削減されたアルカリ乾電池を意味する（鶴田、2008）。なお、同じ種類の電池においてもメーカーや型番、時として個体差にもよって物性値が多少異なる場合はある。そのため得られた結果は実験に用いた特定の個体に対するものであり、同一製品全体を代表したものではない。ゆえに本論文においてはメーカー等の情報は不要と考え、記載しないこととした。また、多くの教科書において単1の規格が採用されているが、実社会と関連付けた学習という意味で単3を採用している大日本図書<sup>2)</sup>に倣い、本実験においても単3を採用した。基礎情報として図2にそれぞれの電池と5Ωのセメント抵抗からなる閉回路におけるセメント抵抗にかかる電圧の時間変化（30秒間隔で測定）を示す（井頭、2015；京極、2013）。

全ての電池において接続直後に急激な電圧低下が起こったのち、電池それぞれの特徴を持ちながら電圧低下の様子（放電特性）が観測された（電気化学会 電池技術委員会、2013；福田、2013）。マンガン乾電池は時間に依存し、急激な電圧低下が行われる一方、他の3種の電池は比較的緩やかな減少となっている。この違い

は放電容量（電池容量）と相関があり、マンガン乾電池より他の3種の方がエネルギー的に大きいことを意味する。これがショート回路となった場合においても発熱量や危険性の違いに影響することが推測できる。アルカリ乾電池と高品質アルカリ乾電池の性能差は顕著には観測されず、ほんのわずかに高電圧・長寿命という結果であった。これは液漏れ防止の安全性や長期保存性などの品質向上が“高品質”の主たる意味であり、使用時間が著しく伸びるという意味ではないと解釈する（鶴田、2008）。充電電池の初期起電力（定格1.2V）は他と比べて低いものの、抵抗にかかる印加電圧の減衰が小さく、放電末期まで高い電圧を保ち続ける結果を得た。図2に示す特性を持つ電池を用いて、それぞれのショート回路について3章以下において議論を行う。なお、電池それぞれの仕組みや構造に関しては多くの書物や論文で公開されていることから本論文においては割愛する（井頭、2015；京極、2013；神野、2019；電気化学会 電池技術委員会、2013；福田、2013）。

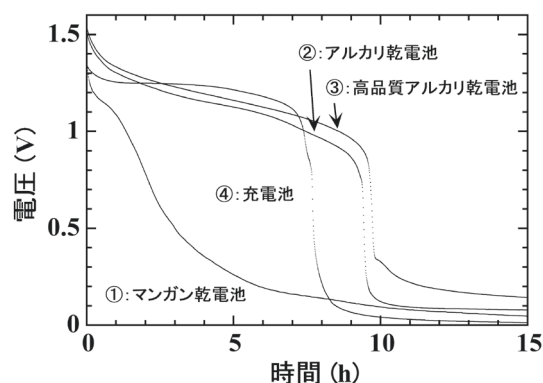


図2. 電池と5Ωのセメント抵抗からなる閉回路におけるセメント抵抗にかかる電圧の時間変化

## 3. ショート回路に関する実験

### 3-1 実験方法

図1(b)及び(c)においては電池にかかる負荷は同じことより、より単純な回路である図1(c)を採用し、教育現場で起こるショート回路を想定した実験を行った（図3）。



図3. ショート回路の様子

具体的には、電池と配線を短絡させ、電池本体の表面温度の時間変化をTタイプの熱電対（モールド型表面センサー）を用いて直接測定を行った。なお、電流計や電圧計を回路に組み込み、これらの物理量も同時に測定することは可能であるが、電流計や電圧計の内部抵抗の影響による負荷低下を避けるために電池とリード線のみのシンプルな構成を採用した。本研究で使用した実験機器等（電池を除く）は以下の通りである。

【使用した実験機器等】

- ・プラスチック製電池BOX及び金属製電池BOX
- ・ミノムシクリップ付きリード線（配線）  
（12芯0.3 sq 長さ約25 cm（抵抗約0.02 Ω）のリード線及びミノムシクリップ（ミヤマ電器 MJ-008）からなる自作リード線。クリップとリード線は半田付けを行い、さらに、リード線と電池ボックスも直接、半田付けを行った。）
- ・モールド型表面センサー（Tタイプ熱電対）、東亜電器株式会社製 MF-O-T  
測定範囲 -100℃～+200℃  
（温度測定に使用）
- ・ポリイミドテープ、太洋株式会社製 1030-02  
耐熱温度205℃（3 hr）  
（電池とモールド型表面センサーとの接着に使用）
- ・データロガー、グラフテック株式会社製 midi LOGAR GL240  
（センサーの温度の時間変化を読み取る）
- ・携帯用小形熱画像カメラ、フリーシステムズジャパン株式会社/株式会社チノー CPA-E4  
（熱画像を視覚的に表示するために使用）

これら機器等を用いて以下に示す手順Ⅰ～Ⅴに従って実験を行った。なお、最大の危険性を評価するために各電池は新品（未使用）またはフル充電のものを用了。

【実験手順】

- Ⅰ：ポリイミドテープを用いてモールド型表面センサーを電池表面2か所（中央部、プラス極付近）に固定する。
- Ⅱ：電池BOXに電池をセットし、電池BOXにつなされたミノムシクリップ付きリード線のクリップを接続させ、短絡させる。
- Ⅲ：2か所のモールド型表面センサーの温度情報を、データロガーを用いて1秒間隔で計測を行う。
- Ⅳ：同時に熱画像カメラを用いて回路の表面温度の変化を動画として録画する。
- Ⅴ：測定を終えた電池において、変形や液漏れ等の物理

的变化の有無を確認する。

手順Ⅰにおいてはモールド型表面センサーを電池に貼り付けるためのポリイミドテープの貼り方や使用する枚数、熱電対の計測位置等の条件が全ての電池において同じになるよう細心の注意を払った。また、電池中央部とプラス極付近との温度差は小さく、最高温度においても最大差約6℃程度であったことから、本論文内では一方の電池中央部の値を電池の温度として採用することとした。なお、電池の破裂等の発生を想定した安全確保対策のために、実験は厚さ10 mmの亚克力板の壁を設置した四方が亚克力板と金属壁で囲まれたドラフト内で実施した。

3-2 実験結果1（プラスチック製電池BOX使用時）

本研究では実験中に起こりうるショート回路の危険性を評価するため、可能な限り教育現場に即した条件下での計測を心掛けた。始めに一般的に教育現場で使用されているプラスチック製電池BOXを採用し、①：マンガン乾電池、②：アルカリ乾電池、③：高品質アルカリ乾電池のどれか1つと接続した回路（図3）における測定をそれぞれ2回行った。得られた結果を図4に示す。

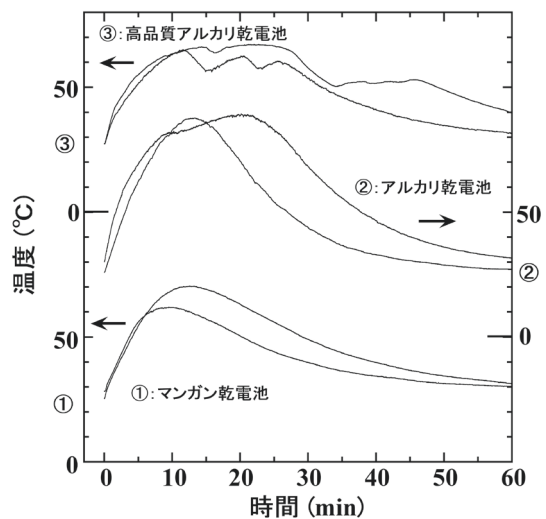


図4. プラスチック製電池BOXを使用した時の各種電池の表面温度の時間変化

マンガン乾電池（①）の場合は接続直後から急激な温度上昇が起り、約10分で最高温度62℃、または約13分で最高温度70℃に達し、その後緩やかな温度減少が観測された。形状としては一山であった。一方、アルカリ乾電池（②）及び高品質アルカリ乾電池（③）の場合は同様な急激な温度上昇が起こるものの複数の再現性の無いピークが観測され、かつ時間的にも長く高温状態を保つ結果を得た。さらに同時に異臭と共にプラスチック製電池BOXの破損も確認された（図5）。これは温度が

上がった電池の熱がマイナス極の金属製スプリングに伝わり、さらに固定しているプラスチックに熱が伝わったことにより溶解したと考える。そして、この溶解によりマイナス極の接触不良が生じ、流れる電流及び発熱が一定で無くなったことが温度変化に複数の山を発生させた原因と推測する。なお、電池の表面温度の時間変化は接触不良の起こるタイミングやプラスチック製電池BOXの変形・破損の仕方が一定ではないことから、温度変化の再現性が認められなかった。また、マンガン乾電池(①)においても破損はしないものの熱によるたわみが生じ、同様の接触不良が起こったことにより、再現性が無い結果を得たと推測する。同様に大きな発熱が伴うことが予想される充電電池においては他の電池同様に再現性のある結果が得られないと考え、測定は行わなかった。



図5. アルカリ乾電池を用いたショート回路の接続前(上)と後(下)のプラスチック製電池BOXの外観変化。接続後に金属スプリング部分(下方右手)で破損が確認された。

以上のことから、ショート回路に関する再現性のある情報を得ることは出来なかったが、プラスチック製電池BOXの破損がショート回路の断片的な断線にもつながり、結果として温度上昇の抑制につながる可能性が示された。さらに、同時に発生する金属スプリングの損傷やプラスチックが溶ける異臭が視覚や嗅覚を活用した指標となり、小中学生が容易にショート回路が発生していることを理解し、危険を回避することが可能と考える。このことは小中学校においてはプラスチック製電池BOXを使用することが好ましいということをサポートするものである。ただし、プラスチックの耐熱温度は樹脂の種類に依存することから、採用する電池BOXごとに変化の仕方が異なるため注意が必要である。

### 3-3 実験結果2(金属製電池BOX使用時)

本研究を遂行するためにはショート回路における電池そのものの温度の時間変化を明らかにすることが求められる。そのため、プラスチック製電池BOXに代わり、高温下においても変形・破損の恐れが少なく、再現性のある結果が得られることが期待される金属製電池BOX

を新たに採用し、改めて測定を行った。①:マンガン乾電池、②:アルカリ乾電池、③:高品質アルカリ乾電池、④:充電電池のショート回路時における電池表面(中央部)の温度の時間変化(3回分)とその傾きの温度変化を図6(a)~(d)にそれぞれ示す。

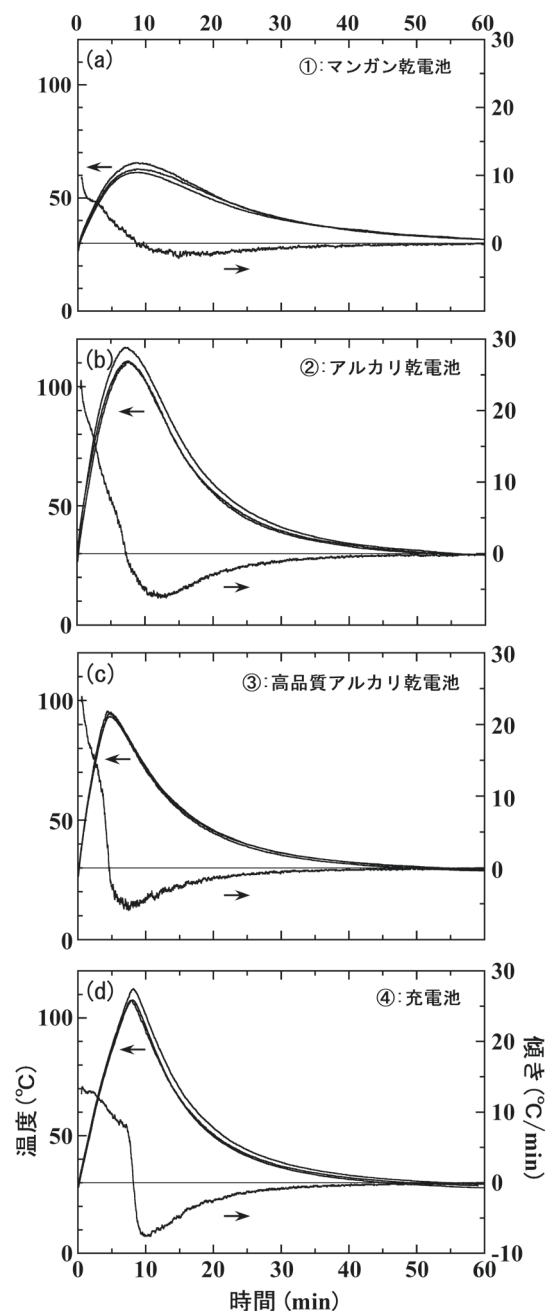


図6. ショート回路内の各電池における温度(中央部)の時間変化((a):マンガン乾電池(①)、(b):アルカリ乾電池(②)、(c):高品質アルカリ乾電池(③)、(d):充電電池(④))

これらの図において、右縦軸で表される傾きは(3)式に従い、1分間の温度変化( $n$ 分を基準として $n+1$ 分後の温度変化)をその中点( $n+0.5$ 分)における傾きと定義し、3回測定の内、最高温度を示した測定(代表値)のみに関して図中に示した。なお、3-1節において説

明した通り、1秒ごとに温度測定を行ったことから  $n$  は 1/60分の倍数で表される数である。各電池の特徴を分かり易くするため、傾きの計算に採用した各電池の測定結果（代表値）を改めて図7に、各々の電池が最高温度に達するまでの時間並びに最大昇温速度を表1にそれぞれまとめる。

$$\Delta T(n+0.5)[^{\circ}\text{C}/\text{min}] = \frac{T(n+1)[^{\circ}\text{C}] - T(n)[^{\circ}\text{C}]}{1 [\text{min}]} \quad (3)$$

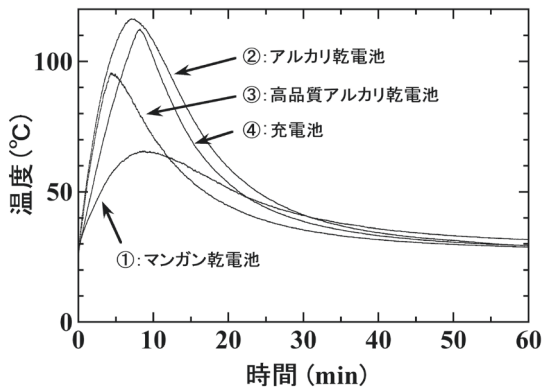


図7.図6(a)~(d)のそれぞれの代表値を重ねた図

表1. 各電池のショート回路における温度変化に関する特性（図6,7より）

電池の種類	最高温度 (°C)	最高温度に達するまでの時間	最大昇温速度 (°C/min)
①マンガン	66	8分34秒	9.6
②アルカリ	116	7分05秒	24.2
③高品質	95	4分21秒	23.9
④充電電池	112	8分13秒	13.6

図6からは、全ての電池において再現性のある1つのピークを持つ温度変化が示されたことから、それぞれの電池において個体差がほとんど無いことが明らかとなった。温度変化の傾きは短絡直後に最大値をとり、時間の経過とともにその値は小さくなり、最高温度においてゼロとなる。そして、その後マイナスの値を持ち、時間をかけてゆっくり再度ゼロに向けて時間変化することが読み取れる。なお、充電電池においては昇温時の傾きの時間変化が小さく、単位時間あたりに発する熱量が比較的一定であることがわかる。また、図7において、上昇した温度と時間で囲まれた面積を発熱量と仮定したとき、マンガン乾電池（①）、アルカリ乾電池（②）、高品質アルカリ乾電池（③）、充電電池（④）それぞれの比は 1.0:1.8:1.1:1.5 と表される。この発熱量の比は表1の項目と関係性が深く、危険性を評価する上での一つの指標となると考える。例えば、マンガン乾電池（①）の最高温度は測定した電池の中で最小であるが、温度減少の傾き

が小さく冷めにくいということから熱量としては高品質アルカリ電池（③）とさほど差は無い。このことは高品質アルカリ電池（③）があまり高温に上がらず、さらに冷めやすいという高性能が示された結果でもある。また、アルカリ乾電池（②）と充電電池（④）においては温度変化の傾向は類似しているが、アルカリ乾電池（②）の方が充電電池（④）より温度上昇の傾きが大きく、かつ最高温度からの温度降下の傾きが小さいことより、熱量としては、アルカリ乾電池（②）の方が大きな値を示した（図7におけるアルカリ乾電池（②）の時間変化の幅が充電電池（④）のものより大きい）。なお、これら電池の温度変化に関する測定は空調管理により室温一定に保たれた空間の中で行われた。従って、外気（室温）との温度差による昇温速度や降温速度への影響は無いと仮定する。

なお、視覚的かつ間接的に温度変化の様子を確認するために行った携帯用小型熱画像カメラを用いた撮影結果を図8に示す。

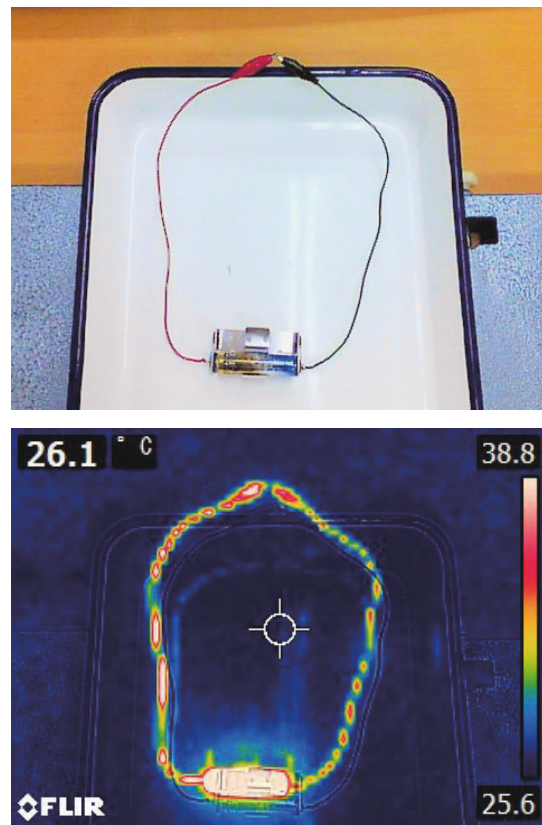


図8.測定中の様子（上図は従来のカメラ、下図は携帯用小形熱画像カメラを用いて撮影）。下図からは電池本体が激しく発熱していることが読み取れる。

上図は実写であり、下部の乾電池入りの乾電池BOXから配線されたミノムシクリップ付きリード線が上部でつながっている様子が写し出されているが、乾電池等が発熱しているかどうかは読み取れない。一方、下図の熱画

像からは金属部分である電池表面とミノムシクリップの接続部の温度上昇が激しいことが見て取れる。なお、熱画像カメラは物体から放出される赤外線から温度を読み取ることより、表面が被覆されているリード線では金属部に比べ温度が低く表示されていると推測する。小型熱画像カメラはまだ一般的には普及していないが、熱変化の可視化という意味では教育現場において、十分に活用できるツールであると言える。

### 3-4 実験結果3（電池本体の物理的变化）

本節では3-3節で示した電池の短絡実験後における電池本体の物理的变化について述べる。始めに実験後の各々の電池の状態について簡単にまとめる。

#### 【短絡実験後の電池の物理的变化の様子】

- マンガン乾電池 (①)
  - ・変化無し (図9内の左)。
- アルカリ乾電池 (②)
  - ・マイナス極付近に少量の液漏れを観測 (図9内の中)。
- 高品質アルカリ乾電池 (③)
  - ・マイナス極付近に多量の液漏れを観測 (図9内の右)。
- 充電電池 (④)
  - ・液漏れは無いが、外装フィルムの伸縮を観測 (図10)。



図9. 測定後におけるマイナス極付近での電池の物理的变化 (左からマンガン乾電池 (①) (変化なし)、アルカリ乾電池 (②) (少量の液漏れ)、高品質アルカリ乾電池 (③) (多量の液漏れ))



図10. 充電電池 (④) における外観の変化 ( (上) : 測定前、 (下) : 測定後)

マンガン電池 (①) は全く変化が観測されなかったが、アルカリ乾電池 (②) と高品質アルカリ乾電池 (③) においてマイナス極付近に「液漏れ」が観測された (図9)。この「液漏れ」は何らかの異常により内部に貯まったガスが外部に放出される時に同時に出てしまう電解液であり、電池の破裂を防ぐために必要な機能である (電気化学会 電池技術委員会、2013)。高品質アルカリ乾電池 (③) は安全機能が向上されており、図7に示す通り、短絡時の温度上昇が抑えられている。そのことはガスの放出がより多いことを意味しており、「多量の液漏れ」が観測されているという事実はそれを支持する結果であった。なお、図9で見られる液漏れは電解液として使用されている無色透明な水酸化カリウム水溶液が空気中の二酸化炭素と反応を起こし、結晶化したものである。これまでに教育現場で液漏れやショート回路に関する重大事故の報告はされていないが、アルカリ乾電池の液漏れにより重度の化学やけどを負った事例 (独立行政法人国民生活センター、2018b) が報告されており、液漏れは極力、発生させないことが大切である。なお、3-2節において示したプラスチック製の電池BOXを使用した実験後 (図4) のアルカリ乾電池 (②)、高品質アルカリ乾電池 (③) からは液漏れが確認されなかった。したがって、液漏れは図4で示された温度より高い、約90°C以上の高温条件下で生じたと推測する。

充電電池 (④) においては「液漏れ」は観測されなかったが、図10に示す通り、外装フィルムの縮みが見られた。この現象と同時に電池本体の熱膨張が起こった可能性を考え、ノギスを用いて使用前後における直径の変化を測定したが、熱膨張は確認されなかった。ゆえに充電電池 (④) においては外装フィルムの縮みのみが発生したという結果を得た。このように液漏れや熱膨張等の危険を伴う視覚的に判断できる物理的变化が確認されなかったことから、ショート回路に使用した充電電池が再度充電及び使用が可能かどうかの検証を行った。具体的には図2と同様に電池と5 Ωのセメント抵抗からなる閉回路に

おけるセメント抵抗にかかる電圧の時間変化（30秒間隔）の測定を改めて行った（図11）。

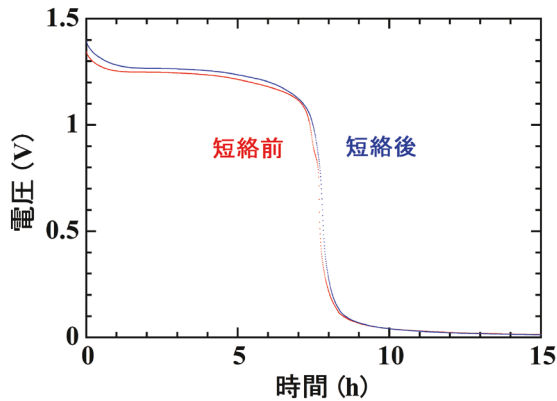


図11. 充電電池と5 Ωのセメント抵抗からなる閉回路におけるセメント抵抗にかかる電圧の時間変化

図11から読み取れる通り、短絡前後において非常に良い一致を示した。しかし、継続的再現性（充電回数による性能変化）は不明であり、短絡の影響の有無を図11からだけでは判断できない。なお、この検証は本実験の目的ではなく、さらに、一度、短絡した電池の継続的使用は避けるべきと考え、これ以上の測定を行わないこととした。

#### 4. まとめ及び示温（サーモ）テープ使用の提案

本研究を通じて、マンガン乾電池（①）、アルカリ乾電池（②）、高品質アルカリ乾電池（③）、充電電池（④）のショート回路時における各電池本体の温度の時間変化並びに物理的変化（破裂、液漏れ等）が明らかとなった。全ての電池において10分弱という短い時間で最高温度に達し、その後ゆっくり温度が下降する様子が観測された。これらの電池において、安全性という観点においては従来から言われていたマンガン乾電池（①）が最も適しているという結果を得た。しかし、中学校では電流計や電圧計など用いた実験を行う場合にマンガン電池の大きな内部抵抗が実験結果に負の影響を与える可能性もあることから、マンガン乾電池（①）の使用に注意が必要なのは周知の事実である（重松ほか、2016；千々松ほか、2021）。一方、アルカリ乾電池（②）、高品質アルカリ乾電池（③）、充電電池（④）は短絡時の発熱温度（最高温度）は高く、その中で、アルカリ乾電池（②）、高品質アルカリ乾電池（③）は液漏れも発生することから、安全性という意味では劣ることが明らかとなった。しかし、図2に示す通り電圧変化が小さく、内部抵抗も小さいことから小中学校で行われる理科実験には適していると考える。本実験全体を通じ

て、短絡時に破裂等の大きな危険を伴う現象は観測されなかったことより、過敏に安全性のみで電池の種類を決めるのではなく、短絡の危険性の理解、起こらないための事前指導・準備、そして起こった時の早期対応が大切であることを強調したい。

最後に、本研究の結果を踏まえ、各種乾電池使用の安全性を高める対応策を提案する。それは図12に示す示温（サーモ）テープ（例えば、日油技研工業株式会社製、TR-40またはTR-60）の使用である。示温テープとは一定の温度になると変色する可逆性のテープであり、ショート回路等により電池が発熱した時に視覚的に判別が可能となる。図8に示した小型熱画像カメラも温度変化を視覚的に観測可能ではあるが、コスト的かつ機能的にも個々の電池を管理することは困難である。一方、この示温テープは安価かつ取り扱いが容易なことから教育現場で活用されやすいアイテムである。さらに3-2節で述べたプラスチック製電池BOXも併用すると、より安全性が向上することが期待される。

本論文において示した結果は我々が採用したそれぞれの電池個々に対する結果であり、同種もしくは全ての電池に対して一般化したものではない。さらに、基礎研究の一環として意図的に「ショート回路」を作り出したものであり、このような使用や実験を推奨したものでもない。ゆえに、短絡による電池の破裂・火花の飛散等の可能性も含め、指導者の管理・指導、並びに使用者の注意のもと、電池の正しい使用を行うようお願いしたい。



図12. 示温（サーモ）テープを貼り付け、短絡させた際の示温テープの色の変化（短絡中（上）、短絡前（下））。上図において、電池の温度が上昇したことに伴い、貼られた2つのシールの下部の色が変色している様子がわかる。

最後に、小型熱画像カメラの使用に際し、山口大学教育学部の西尾幸一郎先生のご協力を頂きました。感謝申し上げます。



## 参考文献

- 井頭均 (2015) 「乾電池の種類の違いによる消耗経過の比較」 関西学院大学教育学会「教育学論究」第7号, 11-20.
- 京極一樹 (2013) 『電池の「なぜ?」がわかると未来が見える』 実業之日本社.
- 重松宏武・兼安真也・吉村大介 (2016) 「小中学校理科・高等学校物理における「電池の内部抵抗」の取り扱いI - 並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのか -」 山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要, 42, 79-88.
- 霜田光一ほか (2016) 『中学校 科学 2』 学校図書.
- 神野将志 (2019) 『電池BOOK: 今、「電池の世界」が熱い! 面白い!!』 総合科学出版.
- 千々松拓矢・重松宏武 (2021) 「小中学校理科・高等学校物理における「電池の内部抵抗」の取り扱い IV - 並列に接続した電池につながれたモーターの回転はどうなるか -」 山口大学教育学部研究論叢 70, 217-227.
- 電気化学会 電池技術委員会 (2013) 『電池ハンドブック』 オーム社.
- 東京書籍 (2016) 『「新編 新しい科学2」 教師用指導書 指導展開編/観察実験編』 東京書籍.
- 鵜田滋樹 (2008) 「用途に合った乾電池の選定」 RikaTan (理科の探検) 2008年11月号, 18-21.
- 独立行政法人国民生活センター (2018a) 「電池の発熱、

液漏れ、破裂に注意しましょう! -災害用の懐中電灯やラジオの点検を-」 独立行政法人国民生活センター公表資料 (2018年7月20日) .

独立行政法人国民生活センター (2018b) 「乾電池の液漏れによって重度の化学やけどを負った農薬散布機 -相談解決のためのテストから No.127-」 独立行政法人国民生活センター公表資料 (2018年1月17日) .

福田京平 (2013) 『電池のすべてが一番わかる (しくみ図解)』 技術評論社.

文部科学省 (2017) 『小学校学習指導要領解説 理科編 (平成29年7月)』 東洋館出版社.

養老孟司ほか (2019) 『未来をひらく 小学理科3』 教育出版.

## 注

- 1). 例えば、組立・実践説明書「電流と電磁石 基本材料 D型 (モーター付) (小学5年 理科実験材料)」 大和科学教材研究所.
- 2). 大日本図書株式会社. “-小学校理科よくある質問- 「なぜ、教科書に掲載されているマンガン乾電池の大きさは、単一型ではなく単三型なののでしょうか。」”. <https://www.dainippon-tosho.co.jp/rika/faq.html> (参照2021年9月1日) .