

小中学校理科「電気による発熱」に関する基礎研究Ⅱ

—細い電熱線の方が早く発泡ポリスチレンを溶かす謎の検証—

前川真利奈*・内田由美子*・棟居 翼**・重松 宏武

A Fundamental Study of “Heat Rise Caused by Electricity”
in Elementary and Junior High School Science II :

A verification of why a thin electrically heated wire melts styrene foam more quickly than a thick one

MAEKAWA Marina, UCHITA Yumiko, MUNESUE Tsubasa, SHIGEMATSU Hirotake
(Received August 6, 2012)

キーワード：電熱線の発熱、金属の電気抵抗、起電力、小学校、理科

はじめに

平成20年3月の学習指導要領の改訂（小学校は平成23年度、中学校は平成24年度から、それぞれ完全実施）により、小学校第6学年に「電気の利用」の単元が追加された¹⁾。この追加により新たに実施されるようになった「電気による発熱」に関する実験において、細い電熱線の方が太い電熱線より発熱が大きくなる（結果として、細い電熱線の方が発泡ポリスチレンを速く溶かす）という、電熱線の抵抗に関する関係式とオームの法則に反する実験事実が教育現場から多数報告されることとなった²⁾。これは電池の内部抵抗、リード線の抵抗、回路の接触抵抗などの影響により、太さの異なる電熱線に等価な電圧がかかっていないことが大きな原因であり、電池の代わりに定電圧電源を用いることにより、問題なく理想通りの結果を得ることができるとされている³⁾。我々は、電熱線の抵抗に関する関係式とオームの法則を活用して、これに則した単位面積当たりの電熱線の発熱量を数式により算出することにより『太い電熱線と細い電熱線の発熱量の逆転現象』の定量的な解説を行った⁴⁾。本稿にはその続編として、「電気による発熱」に関する実験を行うにあたり意識的配慮により事前に解決すべき事項の検証を始めに行い、さらに、引用文献4で示した数式による「電熱線の太さと発熱量の関係」を考慮しつつ、数式だけでは単純に表しにくい実測から得られた実験事実を検証することにより、本単元を深く理解するための知見をまとめる。

1. 「電気による発熱実験」を行う前に確認すべき事項

「電気による発熱」実験は、電圧一定下においては、太い電熱線の方がよく発熱することを発泡ポリスチレンを溶かす時間から理解するというものであり、この実験においては、電熱線の太さと発熱量の関係は数式で表す理想的な関係を満たすことが期待される。しかしながら、実際には人為的な要因が結果を大きく左右する場合がある。それらの要因は、例えば、個人の配線の仕方による接触抵抗の差のように未然に防ぐには限りがあるものと、使用する機器・道具の特性を理解することで防ぐことができるものがある。本章では、後者について、事前に確認しておくべき事項を挙げ検証を行う。具体的には、以下の3点に注目した。

- (1) 電源を入れた後の電熱線の温度の時間変化（1-1小節）。
- (2) 電熱線の温度分布（1-1小節）。
- (3) 新品の乾電池と消耗した乾電池の発熱温度の比較（1-2小節）。

教師は指導するにあたり、第一にこれら3事項に配慮し実験を行なうことが必要と考える。例えば、発泡ポリスチレンを溶かし始めるまでの待機時間や溶かす位置の統一並びに、乾電池の消耗具合の統一を疎かにすると児童の実験結果に大きな違いや矛盾が生じる可能性がある。このことは結果として、児童の理解の混乱を招くこととなる。指導者側は、初歩的な人為的ミスにより「教科書通りに行っているのに実験がうまくいかない」という事案の発生を防ぐためにも、教科書や指導書には書かれていないが実験の成功を左右する機器・道具の特性については、最低限理解しておかなければならないと考える。以下に、先に示した3事項についての確認を行った結果をそれぞれ紹介する。なお、実験回路は教科書「新しい理科6」(東京書籍)³⁾に記載されている条件(乾電池1個、電熱線は長さ50 mmで比較する直径が0.2 mmと0.3 mm)を採用し、その外観図を図1に示す。

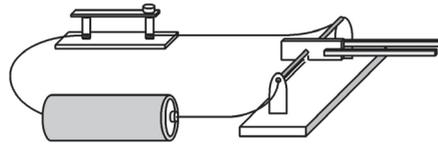


図1 「電気による発熱」実験外観図。乾電池は単1のアルカリ電池を使用した。

1-1 電源を入れた後の電熱線の温度の時間変化と電熱線の温度分布

電熱線の温度の上がり方及び電熱線の温度分布を明らかにするために、図2に示すように熱電対を電熱線の3か所(A、B、C点)に銀ペーストを用いて接着し、それぞれの点における温度の時間変化を測定した。新品の乾電池(起電力約1.56 V)を接続してから180秒後までのA点の温度変化及び安定後のA、B、C点の温度分布を図3(a)、(b)にそれぞれ示す。なお、回路の配線に関しては最大限注意して測定しており、接触抵抗は最小値かつ再現性のある値である。

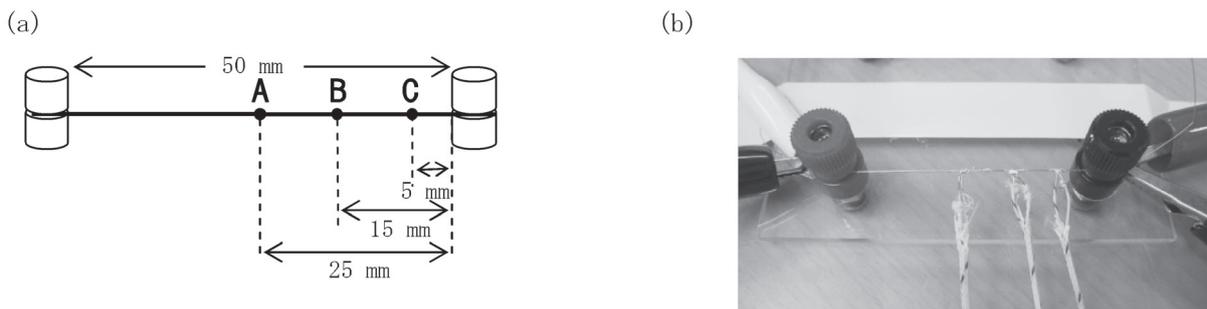


図2 (a) 熱電対の取り付け位置の概略図と(b)実物写真。

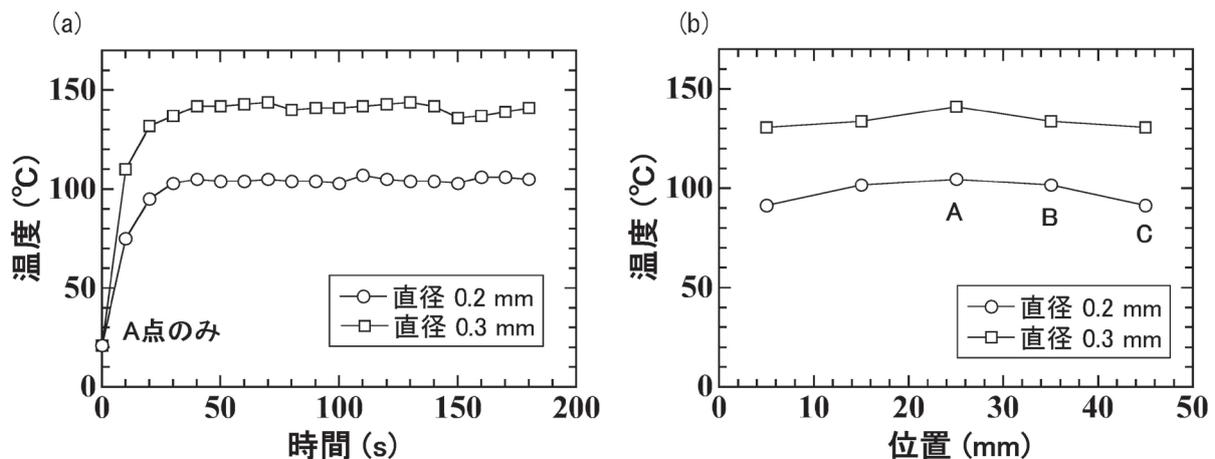


図3 長さ50 mm電熱線の中央部(A点)における電源投入後の温度変化((a)図)及び安定後の電熱線の温度分布((b)図)。(a)図において電熱線の温度が安定したと考えた測定開始後50秒から180秒までの温度と電熱線にかかる電圧の平均値は、直径0.2 mmにおいてはそれぞれ104.6℃と1.27 V、直径0.3 mmにおいてはそれぞれ141.1℃と1.05 Vであった。

図3(a)に示す通り、電熱線の温度の時間変化の傾向は電熱線の太さには関係なく、電源を入れた直後から急激に温度が上昇し、約50秒後には安定することが明らかとなった。この安定時の平均温度（以下、発熱温度とする）は、それぞれ直径0.2 mmの電熱線は104.6℃、直径0.3 mmの電熱線は141.1℃であり、直径0.3 mmの電熱線の方が約37℃高いという結果を得た。この温度差はB、C点においても共通しており、太い電熱線の方が温度が高いという理論と整合性のある結果であった。一方、温度分布に関しては、同じ太さの電熱線では中心部（A点）が最高温度になり、端（C点）との差は約10℃であった（図3(b)）。

これらのことから電源を入れた後、短い待機時間で実験が可能であること、さらに電熱線上どここの温度を測定したとしても、有意な実験差（直径0.2 mmと0.3 mm間の差）を得ることができるということがわかる。しかし、前で述べたように、初歩的な人為的ミスにより正当な結果を得られない可能性をより小さくするためにも、電源を入れた後60秒程度待機した後に電熱線の中央部で発泡ポリスチレンを溶かすという統一条件での実験が好ましいと考える。なお、発泡ポリスチレンの熱変形温度は70-90℃（110℃のものもある）と言われており、図3の結果から直径0.2 mmの場合は発熱温度が不足、時として溶かすことができないという結果を得る可能性もあることを頭に入れておき、事前に予備実験を行うことが大切と考える。

1-2 新品の乾電池と消耗した乾電池の発熱温度の比較

「電気による発熱実験」においては、電源として乾電池・充電電池・電源装置の3つが考えられている（引用文献4、表1）。電源装置を用いる場合を除き、乾電池や充電電池に関しては消耗による起電力の低下を考慮する必要がある。特に学校現場では、常に新しい乾電池（またはフル充電の充電電池）を使用するという事は難しく、何度も授業で使用し消耗した乾電池を用いる場面も多い。そこで、本小節では、消耗した乾電池での発熱温度の測定を行い、前小節で測定した新品の乾電池での発熱温度との比較検討を行った。

具体的には消耗した乾電池として、起電力が約1.35 Vまで低下したものを採用し、1-1小節と同様の測定を行った。なお、測定位置は電熱線の中央部（図2のA点）のみとした。図4に実験結果を示し、発熱温度と電熱線にかかる電圧の具体的な値を表1に示す。

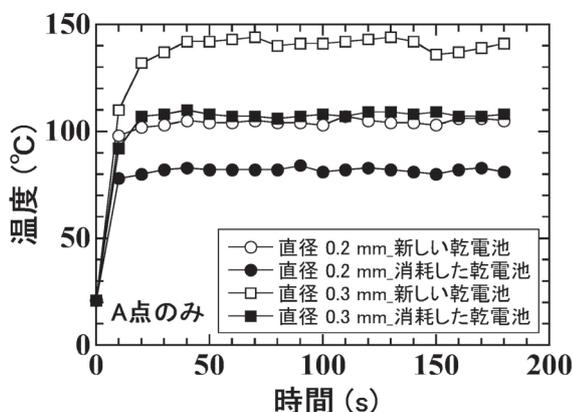


図4 長さ50 mm直径0.2 mm、0.3 mmの電熱線の電源投入後の温度変化。新品の乾電池に関する値は図3(a)と同様のものを採用した。

表1 発熱温度と電熱線にかかる電圧値。それぞれの値は、測定開始後50～180秒間の平均値である。なお、乾電池の起電力は新品のものが約1.56 V、消耗したものが約1.35 Vである。

電熱線	温度 (°C)	電圧 (V)
0.2 mm新品	104.6	1.27
0.2 mm消耗	81.9	1.02
0.3 mm新品	141.1	1.05
0.3 mm消耗	107.7	0.79

新品の乾電池を使用した場合と消耗した乾電池を使用した場合の発熱温度を比較すると、直径0.2 mmにおいては約23℃、直径0.3 mmにおいては約33℃という顕著な温度減少が観測された。このことは、直径0.2 mmの電熱線で消耗した乾電池を用いると、発泡ポリスチレンが溶けない可能性がますます高まることを意味している。消耗した乾電池を使用する際には、細い電熱線でも発泡ポリスチレンを溶かすだけの発熱があるのかどうかを事前に確認することが大切であるといえる。また、授業においてクラス内で起電力の大きく異なる乾電池を用いた場合、太さの同じ電熱線であっても発熱温度が大きく変わる（発泡ポリスチレンが溶ける時間に大きな差が生じる）という結果が生じてしまう可能性があり、児童の理解の混乱を避けるためにも、限りなく起電力の等しい乾電池を用いることも大切な事前確認事項の一つと考える。

2. 様々な場合（乾電池の状態および配線の接触状態による違い）を想定した測定

第1章では、操作による基本的な誤差・失敗を未然に防ぐために事前に確認しておくこととよい事項について3点挙げ、さらに、それらに関する実測値を示しながらその正当性を示した。本章では、第1章で明らかとなった事実を踏まえ、機器・道具の特性についてさらに詳しく理解するべく、学校現場で起こりうるであろう以下の3つの事例を想定し、発熱温度との相関について測定・議論した結果を報告する。なお、第1章に示した実験結果を踏まえて、電熱線の温度の測定箇所は電熱線の中央部（図2(a)中のA点）のみとした。

(1) 乾電池を電熱線に長時間つないだ場合（乾電池の電圧低下による影響）

新品の乾電池を使用し、0、0.5、1、2、4時間後（5点）の電熱線の電圧と温度を測定。

(2) 様々な起電力の乾電池を使用した場合（乾電池間の異なる電圧による影響）

実験室に保管されている自前の使用済み乾電池をそれぞれ5個無作為に選び、電熱線の電圧と温度を測定。

(3) 配線を毎回付けなおした場合（起電力は一定、配線の接触状態の変化による影響）

同じ起電力の乾電池を用い、あえて雑な配線を試み、電熱線の電圧と温度を測定（5回）。

ここで、項目(1)及び(2)は、乾電池の起電力の低下の影響についてより詳細に検証することを目的としており、項目(3)は、人為的な誤差の中でも、未然に防ぐには限りがあると考えた個人の配線の接触の状態が、どの程度結果に影響するのかを検証することを目的としている。ここで、「未然に防ぐには限りがある」という意味は、項目(1)(2)については、乾電池の特性を考慮することで対処法を事前に検討できるのに対し、項目(3)については、回路の配線の接触状態によって毎回変化する値、つまり必然的に生じる誤差を対象としていることから、未然の対応に限りがあるという事を意味する。これら3つのケースを想定して行った実験の結果（電熱線各15点）を図5に示し、続いてそれぞれの項目に関する考察を行なう。

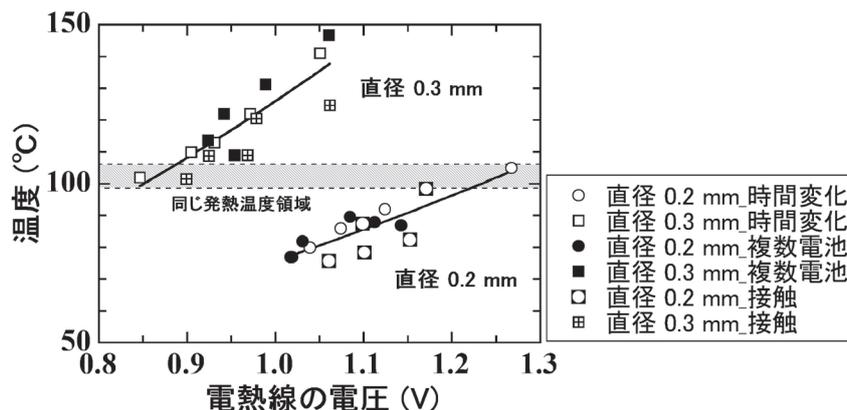


図5 長さ50 mm直径0.2 mm、0.3 mmの電熱線にかかる電圧と発熱温度の関係。時間変化（○、□）に関しては電圧の大きい方からそれぞれ0、0.5、1、2、4時間後の測定値である（なお、直径0.2 mmの4時間後の実測値は他のマーカと重なっており見えないが電圧1.02 V、温度77°Cである）。他の測定値は測定順番と測定値の変化に相関はなく、電熱線に乾電池をつないでから50～180秒間の電熱線にかかる電圧と温度の平均値それぞれ5点を示した。また、破線で囲まれた領域は直径が異なる電熱線にも関わらず、発熱温度領域が重なる範囲を意味する。

(1) 乾電池を電熱線に長時間つないだ場合の結果について

乾電池を4時間つなぎ続けると、直径0.2 mmでは電熱線にかかる電圧は1.27 Vから1.02 Vに、電熱線の発熱温度は105°Cから77°Cに低下し、同様に直径0.3 mmでは電圧が1.05 Vから0.85 Vに、発熱温度は141°Cから102°Cに低下した。つまり電熱線を長時間乾電池につなぎ続けると、乾電池の起電力は次第に低下し、それに伴い電熱線にかかる電圧も低下し、結果として電熱線の発熱温度が低下していくことがわかる。特に測定開始後30分間における電圧の低下率が最も大きいことから、乾電池の継続した接続は避け、効率的な活用（こまめに電源のON/OFFを行なう）を行なうことが重要と考える。ちなみに、図3及び4に示したように電源を入れてから温度が安定するまでの時間は約50秒と短いことから、断続的な電源のON/OFFが実験に支障を生じることは無い。

(2) 様々な起電力の乾電池を使用した場合の結果について

当然のことながら、無作為に選んだ過去に使用経験のある乾電池の起電力には違い（消耗具合の違い）があり、その影響を受けて電熱線にかかる電圧は異なる。今回、我々が選択した電池においては直径0.2 mmでは電池の起電力が0.15 Vの差（1.42～1.57 V）があり、この差は電熱線にかかる電圧0.12 Vの差（1.02～1.14 V）に反映し、結果として発熱温度は約13℃の差（77～90℃）を生むこととなった。一方、直径0.3 mmでは起電力0.15 Vの差（1.41～1.56 V）に対し、電熱線にかかる電圧0.14 Vの差（0.92～1.06 V）、そして発熱温度約37℃の差（109～146℃）となった。このことから、乾電池が極端に消耗していなかったとしても（0.1 V程度の起電力の低下であっても）、発熱温度には大きく反映されることが明らかとなった。また、その傾向は太い電熱線の方が顕著であった。

(3) 配線を毎回付けなおした場合（起電力は一定）の結果について

前に示した2つの事項においては限りなく回路の配線の接触に注意を払い、接触抵抗は最小値かつ再現性があるという前提での測定であった。しかし、ここでは、意図的に配線の接触状態を変えることによる発熱温度の変化を観察した。結果として、配線の影響により直径0.2 mm、0.3 mmの電熱線ともに発熱温度は約23℃の範囲でばらつきが生じた。このことから、個人の配線による接触抵抗の違いが考慮すべき重要な要素の一つであるということが改めて確認された。ゆえに、この点については先に「未然に防ぐには限りがある」と述べたが、この影響を最小限にとどめるためにも、児童が実験を行う際には配線の接触がきちんとされているかどうか、さらに不用意な配線の断線・再配線を行なわなくてすむように注意喚起するなどの配慮が必要であると言える。

以上のことから、同じ定格の乾電池及び同じ規格の電熱線を用いた回路においてもさまざまな要因により電熱線の発熱温度に大きな差が生じることが明らかとなった。特に強調したいことは、この発熱温度のばらつきによって、図5の破線領域のように、異なる太さの電熱線であるにも関わらず同じ発熱温度領域を持つということである。このことは、時として細い電熱線の方が発熱温度が高くなるという逆転現象が起こることを意味している。さらにここで述べた乾電池の使用時間、消耗具合、接触抵抗の違い等の様々な要素が重なった場合には、逆転現象の可能性はより高くなるといえよう。実は、温度に関してのみについて述べると、以上をもって発熱温度の逆転現象の実験的検証がなされたこととなる。しかし、教育現場における実験に沿った発泡ポリスチレンを溶かすことを考慮すると、その溶かす時間には電熱線の温度だけでなく電熱線の太さ（断面積）等の他の要因も結果に影響を与えることが予想される。次章では、この点も含めて異なる教科書会社との比較等も行い、より教育現場での実験に沿った形でさらなる検討を行なった結果を示す。

3. 発泡ポリスチレンを溶かす実験

第1章においては電源を入れた後の電熱線の温度変化及び温度分布、また乾電池の消耗の影響等の一般的な特徴の確認、第2章においては同一の回路における乾電池や接触等の選択条件により電熱線の温度に差が生じることの検証を行った。本章においては、これらの結果を踏まえ、実際に発泡ポリスチレンを溶かす時間の測定を行い、教育現場に沿った検証を行う。はじめに、3-1小節においては、各教科書に掲載されているこれまでとは別の実験条件を採用し、異なる測定条件がどのように発熱温度に影響を与えるかについて実験データをもとに半定量化を行なった結果を述べる。その際、引用文献4)における数式による理論値との比較を行い、その差異についての見解を示す。加えて、電源供給源として乾電池ではなく電源装置を使用した場合には、従来から言われている理論通りの結果を得られるかどうかの検証結果も紹介する。3-2小節においては、それぞれの測定条件での発泡ポリスチレンを溶かす時間を実際に測定し、考察した内容について報告する。

3-1 長さ・太さの条件が異なる電熱線との比較

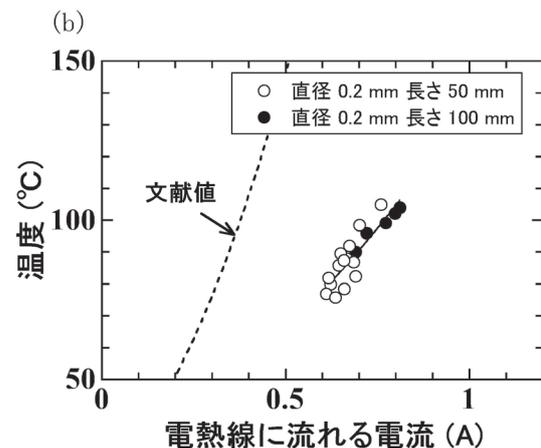
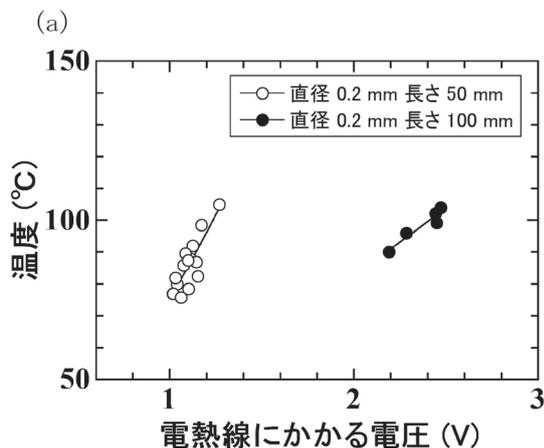
各教科書内に記述している電熱線の太さと発熱量を比べる実験条件はさまざまである⁴⁾。本論文で採用している条件は電力供給源として「乾電池」を用いること、さらに発泡ポリスチレンなどのある物体を溶かす時間の比較を行い、発熱の大小を判断することにある。ゆえに、本小節においては長さ・太さの条件が異なる電熱線の比較として、この条件に合う東京書籍と学校図書を採用することとした^{3,5)}。それぞれの実験条件を表2に示す。

ここで注目すべきことは両社間において「①乾電池の数と長さの違い」があることと、「②比較する電熱線の直径が異なる」ことである。前者①については、乾電池1個当りの電熱線の流さは50 mmと同じであることから、単純に考えると電熱線にかかる電圧は電熱線の長さに比例し、電熱線に流れる電流は同じとなる。しかしながら、現実には回路における乾電池1個あたりの電熱線以外の抵抗（電池の内部抵抗等）の割合が、乾電池の数が多く電熱線が長い場合の方が小さくなることから、電熱線が長い方が単位長さあたりの電圧が大きくなり電流も大きくなる。実験結果もこのことを支持している（図6(a)と(b)）。実はここには2つの重要なことが隠れている。1つ目は電熱線の特性を議論する場合、同じ直径のものであればそこに流れる電流と発熱温度には相関があることである。それは図6(a)と(b)に示すように、長さが違う電熱線の発熱温度は電熱線にかかる電圧では比較しにくい、電流値を用いると長さが違っても単純に発熱温度が比較できる。そして2つ目はその電流値と発熱温度の関係（理論値）は既に公表されていることである⁶⁾。なお、文献値と我々の実験値には大きな差があるが、今回のような実験室レベルでの測定においては、電熱線から無限大の空気に対して熱が放出（伝導）していること、また直径0.2~0.3 mmと非常に細い電熱線であることから微量な風などにも大きく影響してしまうことなどが原因となり、結果として、発熱に必要な電流が文献値よりも多く必要になっているのではないかと考える。もし、熱伝導する媒体が少量かつ有限（例えば、一定量の水槽中に電熱線が置かれる）である場合には然るべきエネルギー変換がなされるものと期待される⁷⁾。さらに言うならば、他研究者による大気中の電熱線の発熱実験においても発熱温度は図6(a)中の実験値と近い値かそれ以下の値を示していることから、図6(b)で示される文献値との大きな差は一般的に起こるものと思われる⁸⁾。

続いて、注目すべきことの後者「②比較する電熱線の直径が異なること」に関してその違いを明確に表している電熱線に流れる電流と発熱温度の関係を図6(c)に示す。長さ50 mm、直径0.2 mmと0.3 mmで発熱温度を比較した場合、重なる領域が存在する。これは図5でも示されたことであり、何ら不思議なことではない。しかし、新たな実験事実として、長さ100 mm、直径0.2 mmと0.4 mmでの発熱温度の差が、長さ50 mm、直径0.2 mmと0.3 mmの結果と比べて、より大きくなっている。つまり、直径0.2 mmと0.4 mmの電熱線を採用すると、発熱温度の同じ領域が存在しないことから細い電熱線の方が太い電熱線より発熱するという結果を生じることがまずありえなくなる。この結果から、乾電池を用いる場合は東京書籍より学校図書の方が測定条件としてはより適していると言える。なお、図6(c)中には表2の東京書籍教科書条件に示された電源装置を用いた発熱実験の測定結果も示した。電源装置を用いた場合は乾電池を用いた場合と比べてデータのばらつきが小さく、かつ比較する電熱線の直径が0.2 mmと0.3 mmであっても発熱温度に有意な差があることを確認することができた。

表2 東京書籍教科書、学校図書教科書内に記述している「電気による発熱」実験に関する情報^{3,5)}。

		東京書籍	学校図書
電力供給源	乾電池	乾電池または充電機1個 電熱線（長さ50 mm、直径0.2 mmと0.3 mm）	乾電池または充電機2個 電熱線（長さ100 mm、直径0.2 mmと0.4 mm）
	電源装置	乾電池1個相当 電熱線（長さ80 mm、直径0.2 mmと0.3 mm）	乾電池2個相当 電熱線（長さ100 mm、直径0.2 mmと0.4 mm）



(c)

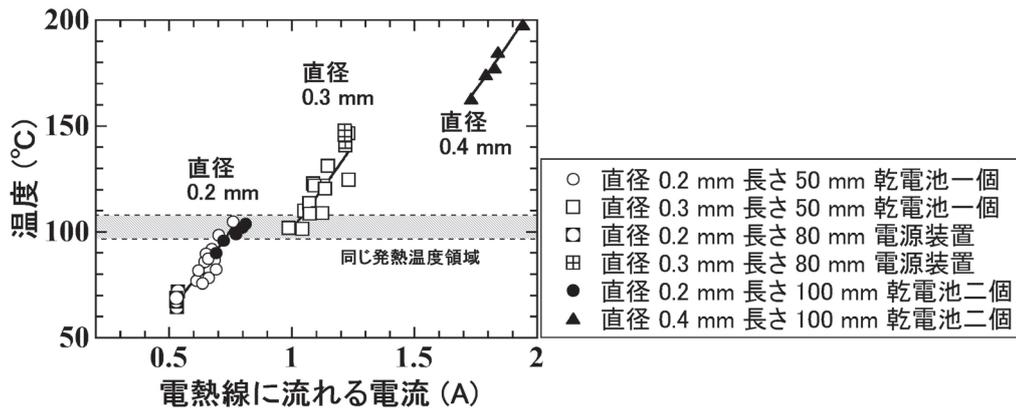


図6 (a図) 直径0.2 mm、長さ50 mm及び100 mmの電熱線にかかる電圧と発熱温度の関係。(b図) 電熱線に流れる電流と発熱温度の関係。直径0.2 mmにおける文献値を破線で示した。(c図) 乾電池を使用した長さ50 mm (直径0.2 mmと0.3 mm) と長さ100 mm (直径0.2 mmと0.4 mm)、および電源装置 (乾電池1個相当) を使用した長さ80 mm (直径0.2 mmと0.3 mm) の電熱線に流れる電流と発熱温度の関係。なお、長さ50 mmの結果は前章で測定したデータであり、長さ100 mmおよび電源装置を使用した長さ80 mmの結果については、使用済み乾電池を無作為に選び、配線には十分配慮し5回測定したものである。電源装置は、ヤガミ製DS-9 V(新型：新教育課程用に製造・販売された物)を使用した。

電熱線の温度測定を主目的とした「電気の発熱」に関する実験結果から、乾電池を使用する場合は、電熱線にかかる電圧及び流れる電流にばらつきが生じることから、その影響を受けにくい比較的直径の差が大きい電熱線を用いた方が良いことが明らかになった。さらに、電源装置は電池間で異なる内部抵抗による影響を考えなくて良いことから、比較する電熱線の直径差が小さくても問題はないということが確認された。しかし、一般論として電源装置を使用する場合においても、使用するメーカーや型式によっては乾電池の場合と同様な負の影響を与えるという報告例もあることから、実験前には必ず予備測定を行い使用する電源装置に適した長さ・太さの電熱線で実験を行うべきである³⁾。ちなみに、図6(c)中における電源装置 (乾電池1個相当) を使用した結果において、直径0.2 mmでは乾電池を使用した場合と比較して低い温度を示すのに対し、直径0.3 mmでは乾電池を使用した場合より高い温度を示している。これについては、電源装置を使用した場合、電源の内部抵抗を考慮しなくてもよいということが関係している。具体的には、電源装置による実験において採用した長さ80 mmの電熱線と、乾電池による実験において採用した長さ50 mmの電熱線の差分である長さ30 mm部分の抵抗値が、乾電池の内部抵抗より小さい場合には、電源装置を使用する方が大きい電流が流れ (発熱温度が高くなる)、逆に長さ30 mm部分の抵抗値が乾電池の内部抵抗より大きい場合には、電源装置を使用する方が小さい電流が流れる (発熱温度が低くなる) ことになる。

なお、我々が引用文献4において示した物理量に関する数式は理論的に正しく、図6(b)中の理論値を支持するものに相当するが、現実論とかけ離れていると言わざるをえない。ここで、この事を確認するため、引用文献4で示した単位面積・単位時間当たりの電力量の比を求める数式を用いて太さの異なる電熱線の電力量の大小関係の理論値を計算し、実際行った実験結果と比較を行なう。以下に、引用文献4の「電圧一定モデル (内部抵抗や接触抵抗を考える)」の単位面積・単位時間当たりの電力量の比の数式を示す (数式(1))。ここでは電熱線の半径を r, r' ($r < r'$)、電熱線の抵抗率は ρ 、長さは l 、電熱線以外の抵抗 (乾電池の内部抵抗や接触抵抗等) を R_0 と表わし、電熱線の半径 r, r' に対応した単位当たりの電力量をそれぞれ $\Delta W, \Delta W'$ と表している。なお、理論値の算出には表3に示すように実測に即した数値を採用した。 R_0 の値については、新品の乾電池を用いて接触抵抗が最小値であるとした第1章の図3測定時における値である乾電池の起電力1.56 V、電熱線にかかる電圧 (直径0.2 mmにおいては1.27 V、直径0.3 mmにおいては1.05 V)、また計算により求められた電熱線の抵抗値 (1.719 Ω と0.764 Ω) から算出、平均化したものを採用した。

$$\frac{\Delta W'}{\Delta W} = \frac{r'(\rho l + R_0 \pi^2)^2}{r(\rho l + R_0 \pi'^2)^2} \quad (1)$$

表3 実験値から得られた具体的な数値。 R_0 については図3の新品の乾電池を用いた実測値から求めた値である。

抵抗率 ρ	$108 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$
長さ l	50 mm
半径 r	0.10 mm (直径0.2 mm)
半径 r'	0.15 mm (直径0.3 mm)
電熱線以外の抵抗 R_0	0.382 Ω

表3に示した値を代入することにより、単位当たりの電力量の比 ($\Delta W' / \Delta W$) は0.995という値を得た。これは、直径が異なる2種類の単位当たりの電力量がほぼ同じであることを意味し、電熱線の発熱温度に差が無いことが期待される。しかし、図3に示した通り、実験的に調べられた発熱温度の差はおよそ37°Cという大きな違いが観測されている。以上で述べた図6(b)の結果及び単位当たりの電熱量の比から類推される発熱温度の理論値と実測値の違いから、残念ではあるが、数式による理論値のみで実験室レベルでの電熱線の電力量(発熱量)を議論することは困難であるということがわかる。とはいえ、その絶対値に関する精度は無いとしても、実験で得られる結果について系統的に考察・検討できる点で、数式による理論値を議論に用いることは価値のあることであると考えられる。

3-2 発泡ポリスチレンを溶かす時間の測定

3-1小節では、乾電池を使用した場合の実験として、異なる電熱線の条件での発熱温度の違いに関する比較検討並びに電源装置の有用性を証明し、さらに実験値と理論値との差についても具体的な検証を行った。本小節では、表2に示した東京書籍並びに学校図書教科書の実験条件(乾電池使用)を採用し、それぞれの電熱線が発泡ポリスチレンを溶かす時間を比較・検討した結果を示す。実験に使用した発泡ポリスチレンは密度が均一である板状のものをホームセンターで購入し、縦20 mm×横20 mm×厚さ5 mmの大きさに切断して使用した。実験は第1章(事前に確認すべき事項)での結果を踏まえ、東京書籍教科書に記述されている実験方法の他に統一する条件を3点追加した。

①発砲ポリスチレン片は電熱線の中央で溶かすこと。

②電源を入れて約1分後に溶かし始めること。

③割り箸の下側に重りとして10円玉4枚(約18 g)をとりつけること(図7参照)。

③に関しては、重りを付けることによって電熱線を押さえつける力の条件統一を図った。また、測定開始時刻は発泡ポリスチレンを電熱線の上に置いた瞬間とした。得られた実験結果を乾電池の起電力、電熱線に流れる電流及び図6(c)から概算した電熱線の発熱温度と共に表4に示す。さらにそれぞれの電熱線に流れる電流と溶かす時間の関係を図8に示す。なお、回路の配線に関しては最大限注意して測定しており、接触抵抗は最小値かつ再現性のある値である。

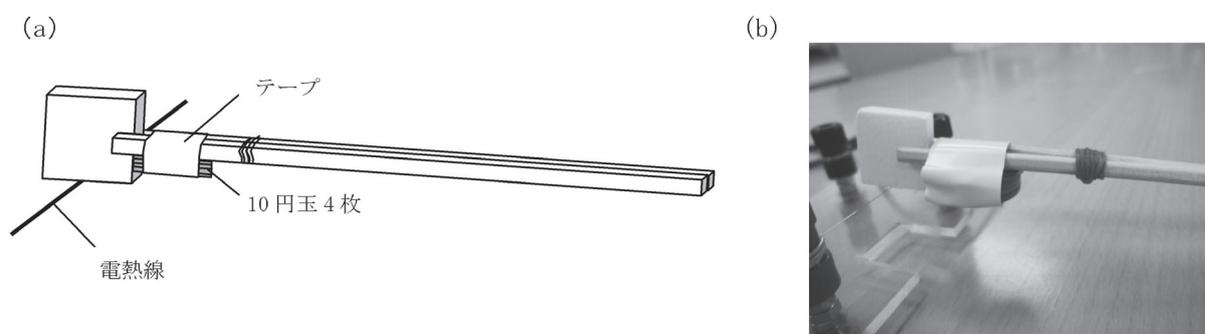


図7 (a)発泡ポリスチレンを溶かす場面の概略図と(b)実物写真。

表4 電熱線の長さ・太さによる発泡ポリスチレンを溶かす時間。異なった乾電池を用いて各5回程度測定した結果である。長さ50 mm、直径0.2 mmと0.3 mm間の比較において、溶ける時間に関する“逆転現象”の可能性のある温度域を網掛けで示した。

東京書籍（乾電池一個使用）				学校図書（乾電池二個使用）			
長さ50 mm, 直径0.2 mm		長さ50 mm, 直径0.3 mm		長さ100 mm, 直径0.2 mm		長さ100 mm, 直径0.4 mm	
起電力 (V) [電流(A)、温度(°C)]	時間 (秒)						
1.58 [0.73、100]	19	1.58 [1.24、140]	12			3.09 [1.94、198]	7
1.56 [0.70、92]	23			3.08 [0.77、100]	13		
		1.53 [1.20、135]	14			3.04 [1.90、192]	9
1.51 [0.68、88]	26			3.01 [0.75、104]	15		
1.47 [0.67、85]	28	1.47 [1.15、126]	16			3.00 [1.81、179]	10
		1.44 [1.11、119]	23	2.90 [0.72、96]	17	2.90 [1.77、170]	11
1.42 [0.63、80]	39			2.89 [0.70、92]	21		
		1.41 [1.01、100]	31	2.86 [0.69、90]	22	2.86 [1.73、163]	12

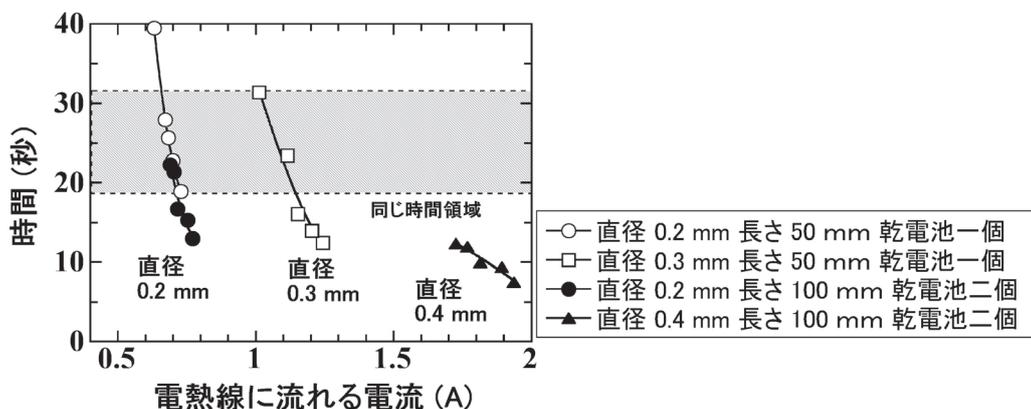


図8 乾電池を使用した長さ50 mm（直径0.2 mmと0.3 mm）、長さ100 mm（直径0.2 mmと0.4 mm）の電熱線に流れる電流と発泡ポリスチレンを溶かす時間の関係。

表4に示した結果から、接触抵抗に変化がなく偶発的に同じまたはほぼ同じ起電力の乾電池を選択できれば、電熱線の太い方が発泡ポリスチレンを速く溶かすという結果を確実に得られることがわかる。そして、当然のことながら、電熱線の温度は直径の太い方が高くなる。しかし、乾電池1個を用いた長さ50 mm、直径0.2 mmと0.3 mmを比較する際に、仮に、前者はより高電圧の乾電池を、後者はより低電圧の乾電池を選択してしまえば、発泡ポリスチレンを溶かす時間の逆転現象が容易に起こってしまうこととなる。ここで注目してもらいたいことは、両者が同じ発熱温度であるにもかかわらず、溶かす時間に大きな差が生じている点である（例えば、電熱線の温度100°Cの場合、前者19秒に対して後者31秒）。これは、割り箸に重りとして取り付けた10円玉による発泡ポリスチレンの単位面積当たりにかかる負荷が、直径が太い電熱線の方が小さくなることが影響していると考えられる。つまり、発泡ポリスチレンの溶かす時間は電熱線の発熱量と1:1の関係ではないということである。このことから、表4の結果において発熱温度に有意な差がある学校図書の条件（長さ100 mm、直径0.2 mmと0.4 mm）の場合でさえも、乾電池の選び方次第では発泡ポリスチレンを溶かす時間の差が小さくなる可能性があり（例えば、直径0.2 mmの電熱線12秒に対して直径0.3 mmの電熱線13秒）、注意が必要であることがわかる。さらに、児童が実験する際、一定の重りを用いるなどの電熱線にかかる圧力の統一をしなければ、個人の手の圧力差がさらなる発泡ポリスチレンを溶かす時間に影響を与える可能性がある。これらのことから、電熱線の発熱量を議論するにあたり、発泡ポリスチレンの溶ける時間を評価するという方法はその発熱量を正當に反映しないため、評価方法として必ずしも適切ではないと言わざるをえない。

これまでの結果を総合的に踏まえると、電熱線の太さと発泡ポリスチレンの溶ける時間に関する“逆転現象”の原因については、回路における電熱線以外の抵抗（電池の内部抵抗等）の影響のみならず、発泡ポリスチレンを用いて評価するという方法自体にも問題があることがわかる。そのため、大日本図書⁹⁾のように液晶温度計を用いて温度変化を読み取ることがもっとも失敗の少ない実験方法ではないかと考える。とはいえ、発泡ポリスチレンを使用することを前提にするのであれば、乾電池を増やすことと同時にそれに対応した長い電熱線を用い、さらに比較する電熱線の直径の差を大きくした方が失敗する確率は下がる。具体的には表2に示した学校図書の教科書に掲載されている実験条件がより好ましいと言える⁵⁾。また、予備実験において、発熱温度の評価を行う際には、電圧ではなく電熱線に流れる電流値を電熱線の温度の判断材料とすることを勧めたい。

児童が本単元を学習するにあたり、電熱線の発熱量を調べる手段として発泡ポリスチレンなどの物が溶けていく様子を観察し時間を測定するという具体的な体験を通して、現象について調べることは、ただ液晶温度計やサーモグラフィーを用いて温度を比較するよりも、より興味を持って取り組み、実感を伴った学びの習得が可能であると考えられる。だからこそ、指導者側は本実験についての理解を深め、本来教えたい電熱線の太さと発熱量の関係において、理解の混乱を招く『電熱線の発熱温度の“逆転現象”』、もしくは『電熱線が発泡ポリスチレンを溶かす時間の“逆転現象”』を起こさないような条件で実験を行えるように事前準備・事前理解を行うことが大切であり、本論文はそのことを再認識する結果となった。

おわりに

本論文は小学校理科第6学年「電気による発熱」の実験を行う際に、子どもたちが実験を通して納得して学習を進めることができるように、指導者側が配慮すべき点をまとめたものである。我々が電熱線の発熱量を算出し定量的に解説を行った『太い電熱線と細い電熱線の発熱量の逆転現象』の続編として、実験室レベルでの検証を行うことができた。引用文献4で紹介した数式がそのまま活用できない結果を得たことは残念ではあるが、逆転現象を回避するための条件を実測から得ることができたことに本研究の意義があったと言える。本論文での知見をぜひご活用して頂き、さらに各自が用いる実験条件下での事前測定を行ない、児童により明確かつ正しい知識を提供して頂けると幸いである。

引用文献

- 1) 文部科学省：『小学校学習指導要領解説 理科編(平成20年8月)』，大日本図書株式会社，2008.
- 2) 鎌田正裕，隈元就仁：「小学校第6学年における電熱線の発熱実験についての考察」，東京学芸大学紀要 自然科学系，62，9-13，2010.
- 3) 東京書籍：『小学校理科教科書 「新しい理科 6」 教師用指導書 資料編』，東京書籍株式会社，2011.
- 4) 重松宏武：「小中学校理科「電気による発熱」に関する基礎研究 一定量的理解度向上のための数式の活用一」，山口大学教育学部研究論叢 61，181-194，2011.
- 5) 学校図書：『小学校理科教科書「みんなと学ぶ小学校理科 6年」 教師用指導書 詳説編』，学校図書株式会社，2011.
- 6) 例えば，「ニッケルクロム電熱線第一種温度と電流表」
<http://www.koowa.com/denkiteikousrn/den21.html>（項目「光和合金株式会社」-「電気抵抗線種類」）
- 7) 山口大学共通教育「物理学実験」テキスト編集グループ：『基礎物理学実験』69-78，2009.
- 8) 「授業に役立つ！小学校理科実験集」：<http://pesj.k12.osaka-kyoiku.ac.jp/kishine/index.html>
（項目「第6学年電気の利用」-「発泡スチロールを切って比べる」-「解説・データ」）
- 9) 有馬朗人他43名：『小学校理科教科書 「たのしい理科 6-2」』，大日本図書株式会社，2011.