

銅線の電気抵抗の温度変化

－中学校理科における発展学習に向けた定量的考察－

内田由美子*・吉岡 真志**・重松 宏武

Temperature Dependence of Electrical Resistance in Copper Wire :
Quantitative consideration for advanced learning
in science classes of junior high schools

UCHITA Yumiko*, YOSHIOKA Masashi**, SHIGEMATSU Hirotake
(Received August 8, 2011)

キーワード：金属の電気抵抗、理科教育、エネルギー環境教育

はじめに

市販の科学実験解説書において、光・音・電気・物体の運動・熱などに関する数多くの実験が紹介されており、これら実験解説書を用いて学習することは目先の現象や概略的仕組みを知るうえでは非常に有益である。しかしながら、その多くが定性的な結果を重んじる傾向があり、現象や仕組みに隠された科学(理科の本質)を理解するには不十分と考える。そこで、中学校理科における発展的な学習の1つとして「銅線の電気抵抗の温度変化」に着目し、ここに隠された基礎科学を掘り起こし、中学校理科教員として理解すべき内容に関する定量的な考察を行った。またこの内容は、近年注目されているエネルギー・環境教育へとつながるものであり、その中でも多くの場合で採用されている『節電・エコ』という視点ではなく、『基礎科学・省エネ技術』を考慮した教育指導への発展が期待されるものでもある。

1. 一般的な「銅線の抵抗の温度変化」に関する実験

エネルギー・環境教育を通じて、生活における省エネやエコの推進が強く求められている。これは、単にエネルギーを節約するだけでなく、LEDやハイブリッドカーといった科学技術の進歩によっても、貢献されるものである。例えば、電力輸送について考えると、送電線の発熱による損失を最小限に抑えるために、発電所から高電圧で電気が送られている。その理由は、高電圧で輸送することにより流れる電流が少なくなり、結果として電力ロスが小さくなるからである。この電力ロスは現在、4.7%と言われている。この値は小さいと感じなくはないが、近年、米国ニューヨーク州の一部では電気抵抗ゼロの超伝導ケーブルを用いた送電がされており、新しい技術・材料開発により送電損失をより少なくする努力が日々行われている。同様に日本でも超伝導ケーブルについての研究・開発が進められている¹⁾。ここで述べた研究・開発の基礎として知っておかなくてはならない科学は「送電線(金属)の電気抵抗は温度によって変化する」、「電気抵抗が小さくなるとエネルギーロスが小さくなる」等である。そして、これらを理解するためには金属の抵抗の長さや直径に関する関係式(中学高校理科での学習内容レベル)にまでさかのぼらないといけない。しかし、「送電線や銅における抵抗の温度変化」に関する実験や教材は多くの実験解説書等に紹介されているが、現象を定性的に理解するためだけの簡素なものがほとんどであり、数式や実験データを用いた定量的な評価をしたものは無いと言って過言ではない。ここでは、その1例を以下に示す。

* 山口大学大学院教育学研究科 ** 奈良教育大学大学院教育学研究科

1-1 一般的な実験解説書における実験例とその問題点

一般的な内容としては例えば、「銅線コイル（直径0.3mm、長さ40m）と豆電球と乾電池2個を直列につなぎ、この銅線をドライアイス（ -78°C ）とお湯（ 100°C ）に個別に浸けてみましょう。そうするとドライアイスで冷やした場合がお湯で温めた場合より、豆電球が明るく点きます（図1．参照）。」と解説されている²⁾。多くは、銅線は絶縁体で被膜されたエナメル線が多く用いられ、温度差を生じさせる手法としては、中学校の教育現場でも扱いやすいドライアイスとお湯がよく活用される。

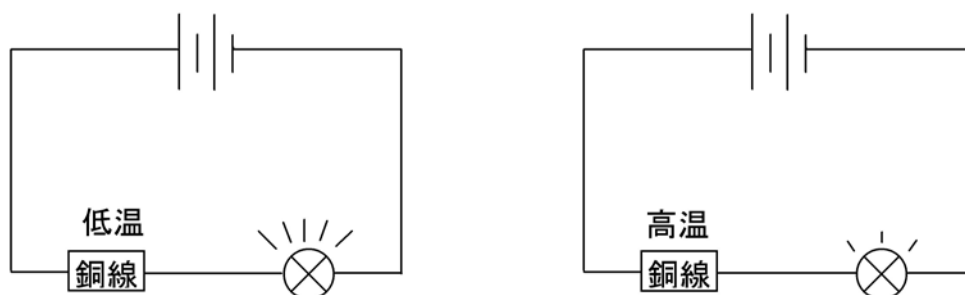


図1：銅線の抵抗の温度変化を行うための実験回路の概要図。なお、図中の銅線とは直径0.3mm、長さ40mの銅線コイルを意味する。実際は銅線部分以外の配線にも電気抵抗はある。しかし、ここでは銅線コイルに対して配線部分は短く、電気抵抗がないものとして扱う（以下の実験においても同様）。結果として、銅線を低温に冷やした場合、豆電球は明るくなり（左図）、高温に温めた場合は暗くなる（右図）。

この結果を踏まえて、「銅線コイルをドライアイスに入れた場合は豆電球の明るさが増し、お湯を入れた場合は暗くなることから、低温になるほど銅線コイルの電気抵抗が小さくなることが分かります。」と謳っている。しかし、「豆電球の明るさが違うからエナメル線の電気抵抗が違う」、「低温になるほど電気抵抗が小さくなることが分かる」と結論付ける根拠はどこにあるのだろうか。決して、その考えに異論があるわけではないが、豆電球の抵抗は一定ではなく、かける電圧によって変化し、同時に照度が変わることを考えると、あまりにも定性的すぎはしないだろうか。もちろん、豆電球の抵抗が一定で変化がないと思っている人にとっては何も不思議ではないかもしれない。しかし、それは恐ろしい誤解の上で生じている見せかけの理解と言わざるをえない。

1-2 定量的考察のために考えるべき点

前節で示した実験において、指導する側としてはより多くの知識を持つ必要がある。具体的には『実験解説書を鵜呑みにする前に考えるべき事』、『書いてあることで説明が抜けている事』、『より定量的な議論を行うために改善がほしい事』がある。以下にそれぞれについて、簡潔に示す。

(1) 事前に考えるべき事

- ・銅線の抵抗に関する特性として「断面積・長さ抵抗の関係」、「抵抗の温度変化」についての知識を持つ。
- ・豆電球の特性（抵抗と照度の関係）についての知識を持つ。

(2) 説明が抜けている事

- ・温度差が必要なのだが、より低温に下げるより、より高温に上げる方が楽と気付かなければならない。しかし、エナメル線の被膜の融点が 100°C 前後のものが多いため実際は高温側に上限があるという基本説明が抜けている。

(3) より定量的な議論を行うために改善すべき事

- ・電流計、電圧計を用いて、銅線部分や豆電球、回路全体における物理量を測定し、より定量的な評価を行う。
- ・豆電球の明るさに関して、時として視覚では判断しにくい差の場合もある。そのため、照度計を用いる。

ここで示したように、銅の抵抗の温度変化を確認するためだけでも、さまざまな知識や工夫が必要なことがわかる。そして、指導する者としては当然理解すべき内容である。教師はこれらの原理について、実験前に検討し、「銅線がなぜ40mも必要なのか」など、紹介されている実験方法自体についても疑問を持つことが必要であり、授業をするうえで大切なポイントとなる。中学校理科において実践した場合、銅線の長さについて疑問を持つ生徒もいるかもしれない。その時に、ただ「40m必要なんだ」と結果を押し付けるのではなく、原理に戻って説明をしたり、「長さを変えてやってみよう」と実験の幅を広げたりして欲しい。そのためには、教師自身が実験解説書通りに現象を理解することに満足してはならないのである。

以下、2章においては定量的考察のための基礎知識として、1-2節で述べた事前に考えるべき事（「断面積・長さとの抵抗の関係」、「抵抗率の温度変化」、「豆電球の特性（抵抗と照度の関係）」）を具体的に示し、3章においては定量的な実験かつ評価を行うために、照度計、電流計、電圧計等を用いた結果について述べる。

2. 定量的考察のための基礎知識

教育現場で行う実験前後において重要なことは、『事前に知識を得て学習する』ことと、『実験後に、得られた結果からいかに掘り下げて考察できるか』ということである。本章では、1-1節で取り上げた実験を例にして、教師として知っておくべき基礎知識をまとめる。

2-1 事前学習 その1（金属の電気抵抗の長さ・断面積依存）

金属導線の電気抵抗 $R[\Omega]$ は、導線の材質・長さ・断面積・温度によって異なり、式(1)で表される関係を持つ。ここで、 $\rho[\Omega\text{m}]$ は抵抗率という。抵抗率 ρ は材質の金属固有の値であり、特定の温度において固有の値を持つ。また抵抗は、導線の長さ $l[\text{m}]$ に比例し、断面積 $S[\text{m}^2]$ に反比例する。

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1)$$

この式は中学校理科での学習範囲で示される式ではなく、高校物理のものであるが、本教材を用いる教師にとっては、最低限理解すべき内容である。また、式(1)を利用して、今回用いた銅の抵抗率 $1.694 \times 10^{-8}[\Omega\text{m}]$ （室温）^{3,4)}、長さ40[m]、断面積 $0.15^2\pi \times 10^{-6}[\text{m}^2]$ から、用いたコイルの室温における抵抗は $9.59[\Omega]$ であることも、事前に知っておくべきである。ちなみに、同じ断面積を持つニクロムの長さ約0.63[m]分の抵抗に相当する。

さらに、式(1)を用いて、事前に考えなくてはならない情報がある。それは「銅線の長さ l と断面積 S の関係」である。例えば長さを変えて同じ抵抗を得るためには、断面積を変化させる必要があり、断面積が大きければ長さを長く、小さければ長さを短くすれば良い。具体的には、断面積を変化させて同じ抵抗値の銅線コイルを作製するためには、もともとの半径 r_1 長さ l_1 、新たな半径 r_2 長さ l_2 とすると、式(1)より、以下の関係式が求められる。

$$l_2 = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 l_1 \quad (2)$$

この原理から、1-1節で用いた銅線の長さ40m（直径0.3mmφ）は必ずしも必要でないということが分かる。この場合、直径0.2mmφのものは約17.7m、直径0.1mmφのものは約4.4mで同じ抵抗を得ることが可能である。ただし、現実論として、教育現場の実験としては直径0.1mmφは細すぎて取り扱いにくい。そのため、直径に限定すると0.2mmφ以上が好ましいと考える。

2-2 事前学習 その2（金属の抵抗率の温度依存）

前節において述べたように、式(1)において、 $\rho[\Omega\text{m}]$ は、抵抗率と呼ばれ、物質の種類や温度によって異なる。また、ある温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における抵抗値 $R(\Omega)$ は、基準となる温度 T_0 における抵抗値 R_0 を用いて式(3)に示すような一次関数であらわされる。 α は抵抗温度係数といい、温度が 1°C 上がる時に抵抗率が変化する割合を示している。 α は、物質によって異なる。

$$R(T) = R\{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (3)$$

式(1)，(3)より、抵抗率の温度変化は、一次関数で表されることが分かる。このことを念頭において、公開されている銅に関するデータをグラフ化した(表1，図2)^{3,4)}。

表1. 銅の抵抗率 ρ の温度変化^{3,4)}

温度(°C)	-195	0	20	100	200	300	497	700	977	1083	1100	1150	1200
抵抗率 ρ [$10^{-8} \Omega \text{m}$] ³⁾	0.2	1.55		2.33		3.6		6.7		21.3			
抵抗率 ρ [$10^{-8} \Omega \text{m}$] ⁴⁾			1.694		2.93		4.6		8.1	21.1	21.2	21.6	22.1

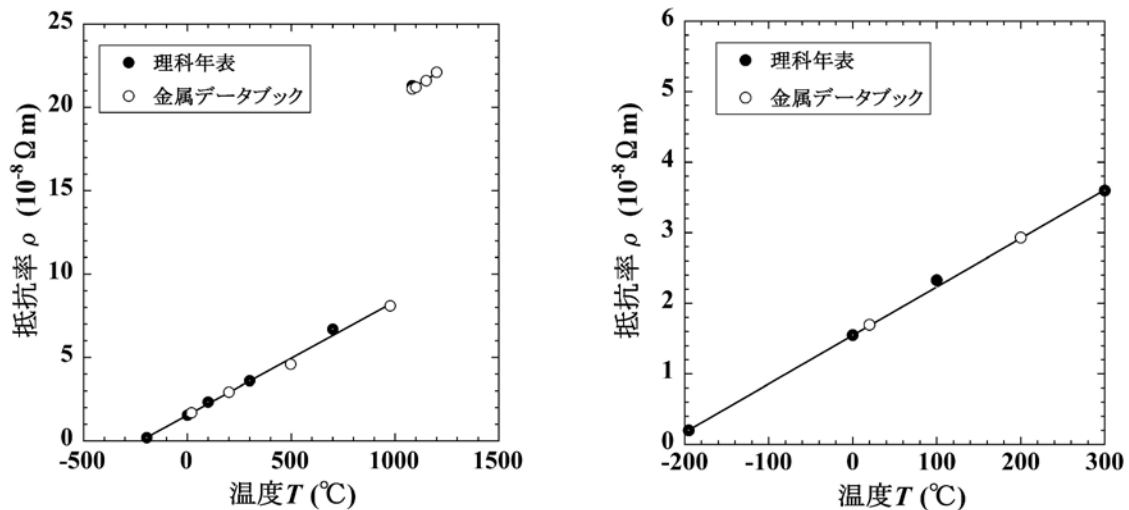


図2：銅の抵抗率の温度変化。(左)全データ。銅の融点が1084.5°Cであるため、1000°C付近でデータの跳びが生じる。(右)左図からの拡大図。300°C以下のデータのみを採用しての最小二乗法によるフィッティング。

図2に示したように温度によって抵抗率が異なる理由は、導体の温度を上げると、導体を構成する陽イオンの熱振動が大きくなり、自由電子の運動がより大きく妨げられるからである⁵⁾。つまり、ここでの実験においては、銅線を低温に下げると、銅線内部の陽イオンの熱振動が小さくなり、電気抵抗が小さくなる(高温はその逆)ということである。

本実験においては最高温度100°Cを想定している。300°C以下の理論値(図2(右))を採用することによって、温度 T (°C)と抵抗率 ρ [$10^{-8} \Omega \text{m}$]について以下の関係式を得る。

$$\rho(T) = 1.5475 + 0.0068725T \quad (4)$$

ゆえに、用いる銅線の長さと断面積を決めれば、式(1)、(4)をもとに銅線部分の電気抵抗の温度変化を計算することができるようになり、これによって温度変化に伴って電気抵抗がどれくらい変化するかを事前理解することが出来る。例えば、1-1節の実験は、「低温-78°C、高温100°C、直径0.3mm ϕ 、長さ40m」という条件より、用いた銅線コイルの抵抗の理論値は低温で5.7 Ω 、高温で12.7 Ω ということが分かる。つまり、直列につなげられた銅線コイルの抵抗をおよそ5.7 Ω ~12.7 Ω 変位させることにより、豆電球の照度の差を比較していることを意味する。

2-3 豆電球の特性についての定量的実験とその評価(抵抗と照度の関係)

1-1節の実験で、回路全体で何が起きているか考えるためには、豆電球の特性を理解することが必要となる。広く紹介されている実験解説書には²⁾、多くのケースで豆電球の種類や規格についても記されていないため、それについての考察も行った。ちなみに豆電球の電圧の規格は1.5V(乾電池1個用)、2.5V(乾電池2個用)、3.8V(乾電池3個用)などいろいろな電圧に対応したものがある。同様に電流の規格も0.15A、

0.3A、0.5Aなどがある。同じ電圧の場合、規格電流が小さいものは暗く、規格電流が大きいものは明るいことから、実験に際して豆電球の選択も重要なことがすぐわかるであろう。

2-3-1 豆電球の特性についての実験

比較的規格電流の大きい2種類の豆電球（1.5V 0.5Aと3.8V 0.5A）を採用し、これら豆電球の特性を調べるために、電圧を変化させながら、豆電球にかかる電圧や電流を計測した。同様の実験は、豆電球の電気抵抗が一定ではないことを学習するために、高等学校の学習内容としてよく用いられるものである。我々はさらなる定量化として豆電球の照度の測定も行い、電圧や電流との関係も明らかにした。図3及び4にそれぞれ実験の概要図と概略図を示す。

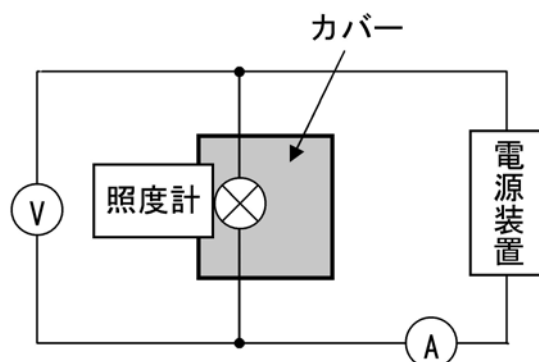


図3：豆電球の照度と抵抗の関係を調べる実験の概要図。豆電球の照度を計測する部分には、光が入らないようにカバーを用いた。



図4：(左)実験の概略図。(右)豆電球と照度計の拡大図。豆電球と照度計は、計測部分と豆電球を接触させた。電圧計・電流計は、METEX社製デジタルマルチメータM-4660Aを、照度計は、MASTECH社製デジタルマルチメータMS-8209を使用した(照度計・電流計・電圧計は、以下の実験でも同様)。

2-3-2 豆電球の特性についての定量的評価

本小節では、2-3-1小節で行った実験結果を元に豆電球の特性について議論を行う。図5, 6に豆電球の電圧 V と抵抗 R の関係、豆電球の電圧 V と照度 L の関係をそれぞれ示す。

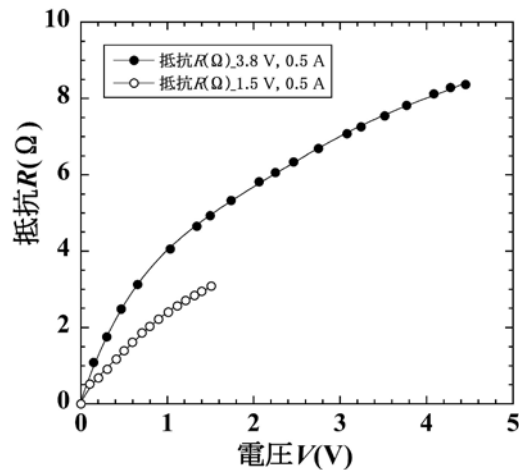


図 5：豆電球 (1.5V 0.5A, 3.8V 0.5A) の電圧 V と抵抗 R の関係。豆電球の電気抵抗は一定ではない(豆電球のように電気抵抗が一定でない電気抵抗を非直線抵抗という)。その理由は、豆電球のフィラメントは、電圧を上げていくと温度が上がるので、抵抗 R もそれにつれて大きくなるからである。

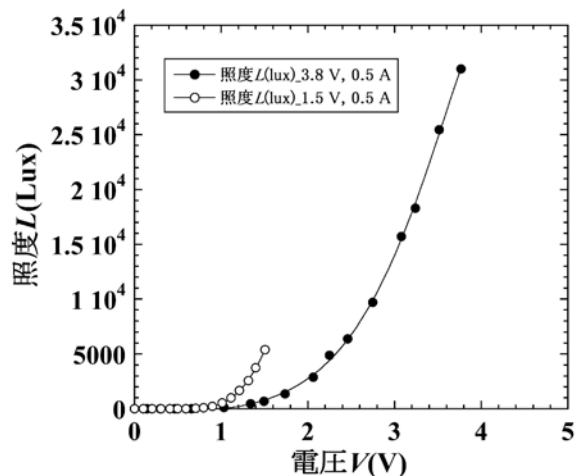


図 6：豆電球の電圧と照度の関係。豆電球 (1.5V 0.5A, 3.8V 0.5A) の結果である。照度は規格電圧の約半分から急激に増加する。電圧が高い方が照度の差は明らかである。4V以上では照度計で計測できる数値 (4000Lux) を超えていたため、データを得ることができなかった。

豆電球 (1.5V 0.5A, 3.8V 0.5A) の電圧 V と抵抗 R の関係 (図 5) から、豆電球の抵抗は電圧に対して一定でないことがわかる。さらに豆電球の電圧と照度の関係 (図 6) からは、照度はある電圧に達するまで、ゼロである (点灯しない) ことや、その電圧を超えてから急激に照度が上昇することが読み取れる。また、電圧が高い方が照度の差の変化が顕著であり、1-1 節で示した実験の条件としては、より耐電圧の豆電球 (今回は 3.8V 0.5A) を用いてそれに耐えうるより高圧な電源 (電池) による実験が好ましいことがわかる。さらに重要なことは、銅線コイルの抵抗の温度変化が豆電球にかかる電圧に顕著に影響するためにも、銅線コイルと豆電球の抵抗を同程度になるように設定することである。ゆえに、直径 0.3mm、長さ 40m の銅線コイルの場合 (抵抗変化 2.7~12.7Ω) はおのずと 3.8V 0.5A 規格のものが適しているのである。

豆電球の特性は、1-2 節において挙げたように、隠された科学の 1 つであったが、銅線の抵抗の温度変化と豆電球の照度を論ずる上で、当然考慮すべき点である。次章では 1, 2 章で積み上げた事前理解を活用した定量的理解を目指した試行実験の結果を紹介する。

3. 照度計・電流計・電圧計を用いた定量実験の試行

これまで、抵抗の計算方法、豆電球の規格や特性、直列回路における銅線と豆電球の抵抗の関係について

考察した。以下にこれらの考察をもとにして、実験解説書では定性的だった部分、明確でなかった部分を改善した試行実験とその評価を示す。

3-1 抵抗の温度変化と豆電球の照度に関する試行実験

ここでは、1-1節に挙げた定性的な実験を1, 2章で述べた実験を考慮して定量的に議論するために、図1に示した回路の発展系として図7に示した回路を作成し、銅線コイルの温度 T 、回路に流れる電流 I 、銅線コイルの電圧 V_1 、豆電球の電圧 V_2 、豆電球の照度 L そして豆電球の抵抗 R を計測した。温度変化させる銅線は、長さ30m直径0.3mm ϕ を用い、温度変化は、液体窒素 -196°C 、ドライアイス-エタノール溶液 -78.5°C 、氷水 0°C 、湯 50°C とした。このドライアイス-エタノール溶液とは、ドライアイスが -78.5°C であるため水の代わりに融点が高いエタノールを溶媒にして、寒冷剤としたものである。

式(1)、(4)より、抵抗 R は表2のように変化する。ゆえに、 -196°C から 50°C の範囲では、約 $1\sim 8\Omega$ の変化を示すことが分かる。豆電球(3.8V 0.5A)の電気抵抗が最大で約 8Ω あることから(図5)、それ以上過度に銅線コイルの電気抵抗を加える必要がないと判断したからである(つまり、採用した豆電球の場合、直列につなぐ銅線コイルは直径0.3mm ϕ ならば40mではなく30mで十分だということである)。

表2. 長さ30 m直径0.3 mm ϕ の銅線の電気抵抗 R (理論値)

温度($^{\circ}\text{C}$)	-196	-79	0	20	50
抵抗(Ω)	0.851	4.264	6.568	7.151	8.026

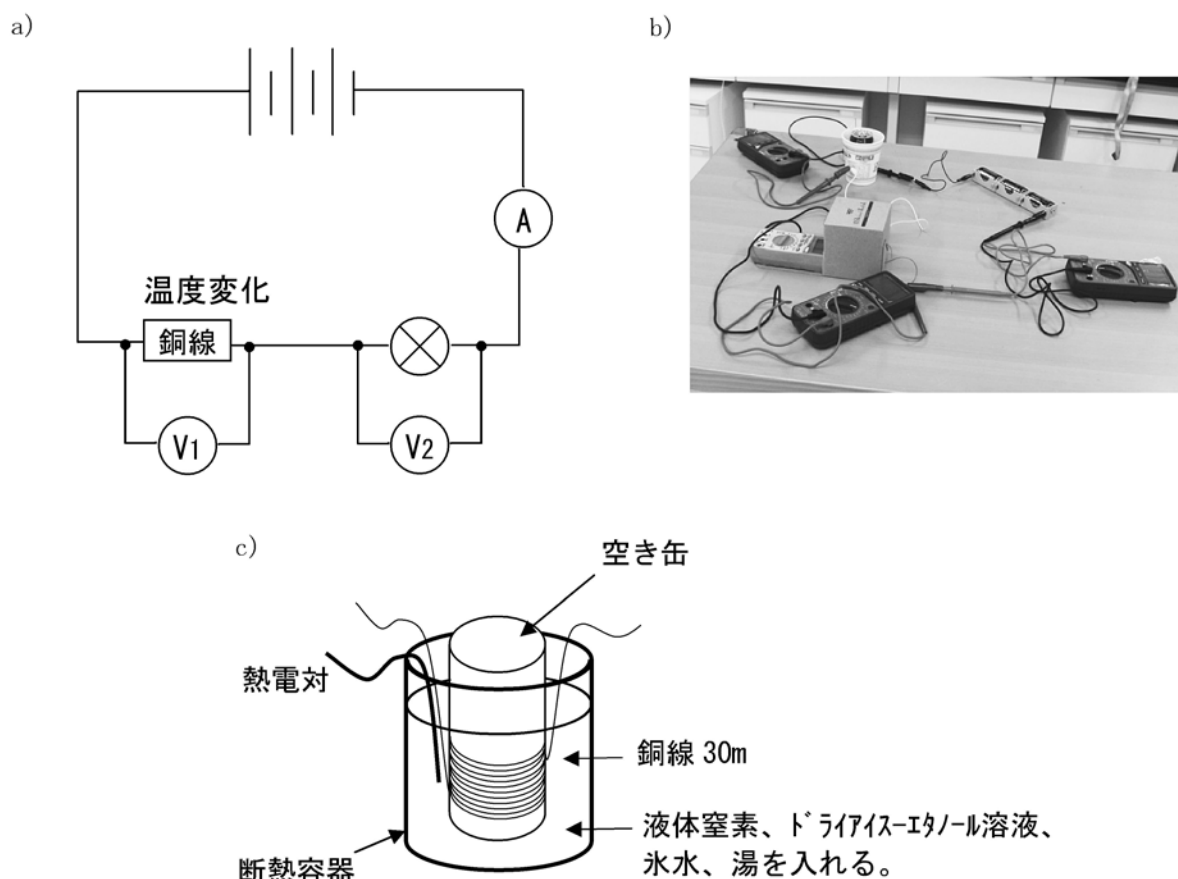


図7 : a) 概略図。 b) 概略図(写真)。 c) 銅線部分の概略図。

長さ30m、直径0.3mm銅線。単1乾電池3つ、3.8V 0.5A豆電球使用。銅線部分を、液体窒素 -196°C 、ドライアイス-エタノール溶液 -78°C 、氷水 0°C 、湯 50°C と温度変化させていき(温度 T は熱電対で計測)、電流 I 、銅線部分の電圧 V_1 、豆電球の電圧 V_2 、照度 L を測定した。豆電球の照度は、周囲の光をさえぎるためにカバーをして、電球を照度計に接近させて計測した。

3-2 試行実験の結果と考察

3-1 節で示した実験結果として「銅線の温度変化と抵抗の関係」と「銅線の電圧と豆電球の電圧の関係」を図8に、「銅線の温度変化と豆電球の照度と電力の関係」を図9にそれぞれ示す。図8からは式(4)から導いた理論値（一次関数）と実験値とが非常に良い一致を示したことがわかる。銅線コイルの抵抗の温度変化は温度に対して一次関数で表されるが、電流や銅線の電圧、豆電球の電圧は非一次関数的変化をする。結果として、抵抗が温度に関して比例であるにもかかわらず、銅線コイルにかかる電圧 V_1 が豆電球にかかる電圧 V_2 同様に非一次関数としての挙動を示す様子が現れる（図8（右））。また、合成電圧 V_1+V_2 は温度に対して変化することなく、平均4.16Vの値を保った。以上のように銅線の抵抗及びその温度変化、さらには豆電球の特性を深めながら、回路の豆電球の照度と電力の温度変化を視覚ではなく、デジタルデータとしてその強弱や変化を明らかにした結果が図9である。豆電球の照度は電力によるが、図9では照度と電力の温度変化が完全に一致しないことが読みとれる。その理由は、豆電球に供給される電力は熱エネルギーとしても放出されており、発光エネルギーとして実際に照度にかかわる電力は一定ではないからである。図9からは、銅線コイルの温度が高くなると豆電球にかかる電圧は小さくなり（図8（右））、発光エネルギーの割合が低くなる（つまり電力のほとんどが熱エネルギーとして放出されている）ことも読み取れる。

最後に蛇足ではあるが、その他改良・気づくべき項目を挙げると以下ようになる。

- 図7の空き缶の使用は安全面では有効だが、冷やす体積を増やすことによる熱のロスを考えると、銅線を束にするだけで十分でもある。
- 長さ30m直径0.3mmφの銅線と同じ抵抗値を示す0.2mmφ長さ13.3mの銅線の方が実験を行いやすい（実践し、実験結果としても本論文で示した結果と同じことを確認済み）。
- 図7の実験において電池3個を用いたことから約4.5Vの電圧を期待するが、結果は4.16Vであった。これは電池の内部抵抗や電池の起電力の低下により、抵抗と豆電球に加わる電圧が4.5Vより小さくなったからである。このことは2-3節で述べた豆電球の規格電圧が1.5V（乾電池1個用）、2.5V（乾電池2個用）、3.8V（乾電池3個用）と低い設定になっていることにつながることもある。

これらのように1つの実験を通じても、受け取り手が探求する気持ちを持てば、新たな発見や知識の習得が尽きないのが科学である。そして、本論文で示したすべての内容は、指導者である中学校理科教員に既知の知識として知っていてほしいものでもある。

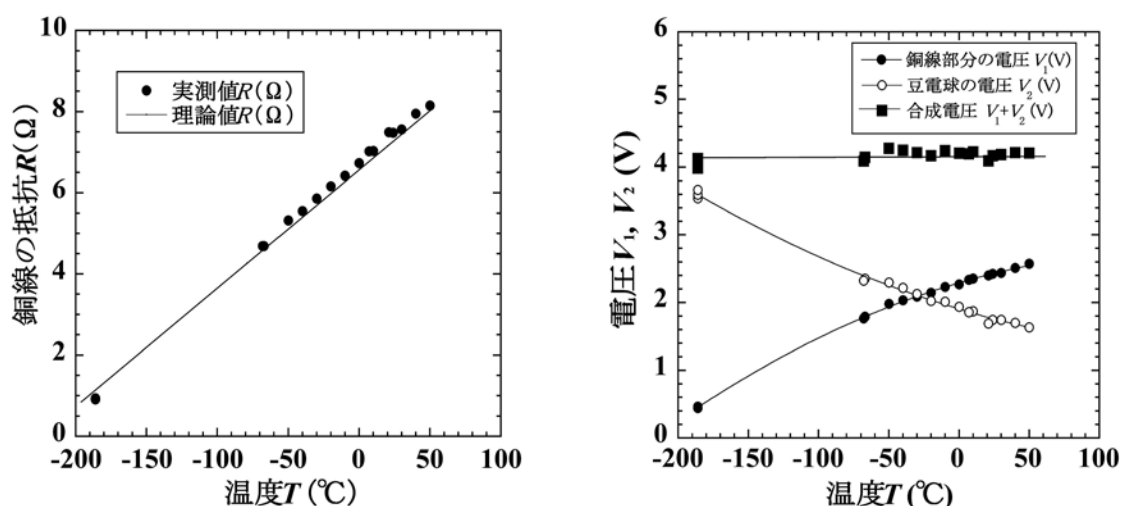


図8：（左）温度 T と銅線の抵抗 R の関係。（右）温度変化における銅線の電圧 V_1 と豆電球の電圧 V_2 の関係。温度が上がるにつれて銅線の電気抵抗は直線的に増加する。それに伴って、銅線の電圧は増加。回路全体の電圧は変化しないので、豆電球の電圧は減少していく。

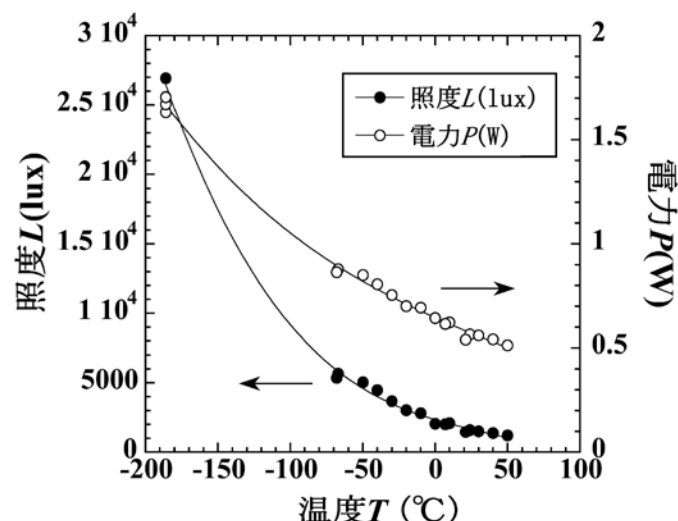


図9：温度 T と照度 L ・電力 P の関係。温度が上がるに従って照度は低下する。50℃で豆電球が消灯することはなかった。曲線で表される。

4. 中学校理科における発展学習に向けて

本論文で示した実験・研究内容の有効性を確認するために、島根県出雲市教育委員会主催の中学校教員研修（平成22年8月12日）において実践した。具体的には、はじめに、実験書の情報だけを提示し²⁾、その中に隠れている科学を考えながらより定量的に理解するために工夫しながら実験をするよう指示した。そして、実験終了後に事前・実験中・事後に気づくべき点を挙げさせ、さらに本論文で示した内容も提案し、課題を本質的に理解するために必要な事項に関する学習を行った。最後に、これら事項を踏まえて再度、実験を行い、理解度の向上を図った。研修後に行ったアンケート結果からは課題の面白みを感じ、教員研修向けのカリキュラムとして有効であるという回答を多数頂いた。同時に、「銅線の電気抵抗の温度変化」という課題はエネルギー変換効率や超伝導物質の仕組みを簡便に理解させる時の教材として中学校教育現場で実践したいという声も頂いた。提案した課題は単純な金属の温度変化に留まらず、実験予測能力の向上や豆電球の照度や抵抗の変化といったさまざまな科学的知識を得ることができる発展的学習のための教材として活用できるという手応えを得ることができた。

おわりに

市販の科学実験解説書は、身近なものを用いて物理現象を定性的に理解させることや、科学に興味を持たせることを目的に書かれた場合が多い。当然、著者はそこに隠れた科学を十分理解しており、その隠れた部分も含めて読者が理解することを期待していると思うが、多くの場合が実験書通りに工作するだけの定性的理解にとどまっている。今回、実験解説書に記載された1つの実験をもとに定量化を試みたが、実験中はもちろん、実験前後に学習すべき点は多く、実験解説書に書かれていることをそのまま行うだけでは、本質的な物理現象を理解することにはならないと身を持って感じた。実験解説書に限らず、教科書の実験においても同様なことが当てはまると思う。ものの本質を定量的に理解することは時には苦しいかもしれないが、その分、理解した時の喜びは格別である。本論文で示した手法・着眼点が活用され、さまざまな科学実験において、より定量的理解を求めた解説書や論文が出てくることを期待したい。

最後に本論文で述べた活動の一部は（財）日本教育公務員弘済会（平成22-23年度）からの研究・事業助成により活動を行っている。ここに感謝申し上げる。

引用文献

- 1) パワーアカデミー：『世界一の電気はこうしてつくられる!』オーム社，132-134，2009.
- 2) 例えば、日本ガイシ：「家庭でできる科学実験シリーズ 電気抵抗」NEWTON 11月号，0-1，2009.
- 3) 国立天文台：『理科年表』，丸善，408，2009.
- 4) 日本金属学会：『金属データブック』，丸善株式会社，14-15，2004.
- 5) 兵藤申一，福岡登，高木堅志郎ほか14名：『高等学校 物理Ⅱ 改訂版』，啓林館，111，2008.