

【 論文 】

電気抵抗の視覚的理解が可能な新規教材開発

— 中学校理科・高等学校物理・理数探究における活用 —

○新鶴田 道也¹・大久保 博和¹・岩山 勉²¹愛知教育大学大学院・静岡大学大学院教育学研究科共同教科開発学専攻・²愛知教育大学教育学部

要約

カーボン・ペーパーを用いて、回路における電気抵抗の視覚的理解が可能な新規教材を開発した。カーボン・ペーパーを抵抗器として教材化することで、電気抵抗は「電流の流れにくさ」を表す物理量であり、抵抗の大きさは抵抗体の長さに比例し、幅に反比例することを、実験的に理解することが可能となる。本教材により、抵抗体の形状の変化を視覚的に理解することができることに加え、従前の教材では困難であった、再現性が担保された定量的な実験が、生徒による主体的な学習活動の中で実現可能となる。また、中学校理科や高等学校物理における合成抵抗の学習では、本教材を用いた実験により、抵抗体の形状と抵抗値との関係を根拠として、視覚的かつ実験的に理解できる。特に、並列接続における合成抵抗の関係式について、「電流の流れやすさ」を表す物理量であるコンダクタンスの考え方を導入することによって、逆数の和になる根拠を「電流の流れやすさ」の和として明確に説明することができる。さらに、カーボン・ペーパーは取り扱いが容易で、応用性が高いことから、生徒自身が課題を設定して主体的に探究できるため、高等学校の新科目「理数探究」における探究的な学習の教材としての活用が期待される。

キーワード

カーボン・ペーパー、電気抵抗、教材開発、理数探究、理科教育、視覚化実験

I. 問題及び目的

学習指導要領によると、小学校から高等学校までの理科授業において電気に関する内容が扱われている。電気は生活に身近で必要不可欠な存在であり、これまでの理科教育において重視されてきた内容の一つである。特に近年は科学技術の発展が目覚ましく、科学リテラシーの育成や、次代を担う人材育成など、様々な観点から注目されている。

これらを背景として、理科教育において電気に関する学習内容の理解に着目した研究が盛んに行われている。その内容は、概念形成や学力調査、教材や指導法の開発など、多様である。これらの研究から明らかとなった問題点として、電気に関する学習は理解度や好感度が低いことが挙げられる。電気に関する理解度について、藤井、吉本(1977)は、中学生や高校生を対象とした調査から、オームの法則や電気抵抗の理解は公式的、表面的なものに止まっている生徒が多いと指摘している。また、好感度について、川村(1996, 1997)は高校生を対象とした調査から、中学校段階において電気回路の学習を含めた物理嫌いが深刻化していることを示している。最近では、原田ら(2018)の中学生に対する調査から、中学校2年生の電気に関する内容の統制感と興味価値が低いことが報告されている。

文部科学省による全国学力・学習状況調査では、電気抵抗の概念形成について課題があることが繰り返し指摘さ

れている。例えば、平成27年度(2015)の調査では、オームの法則を用いて電気抵抗を導出する基本的な問題の正答率は59.9%である。この結果は、約40%の生徒において、電気抵抗の基本的な概念形成が十分に行われていないことを示す。また、平成30年度(2018)の同様の問題における正答率は52.3%であることから、改善されているとは言えない現状がある。

福山(2000)は、電気回路の理解に困難が生じている原因の1つに、電流、電圧、抵抗の概念について適切なイメージを描くことができずにいる点を指摘し、適切なイメージを伴って理解するためには、新しい実験の開発が必要である点を強調している。

これらの調査や研究を受けて、近年、電気抵抗に関する直感的な理解を促す、新しい教材や指導法の開発が盛んに行われている。石川、鎌田(2018)は、鉛筆の線を手描き抵抗として教材化し、抵抗体の形状と抵抗値の関係を視覚的に捉えさせることに有効であると述べている。また、酒井ら(2018)は、エレファンテック(旧 AgIC)社が開発した、インクの顔料に銀粒子を含む回路マーカー「Circuit Marker」の、授業での活用について提案している。

手描き抵抗や回路マーカーを使用すれば、線の太さや長さの変化による抵抗値の違いを定性的に理解することが可能である。しかし、所定の線の太さや長さを正確に描くことは極めて困難であり、授業時間内で再現性のあ

る定量的な実験を行うことはほとんど不可能である。

筆者らは、カーボン・ペーパーを抵抗器として教材化することで、抵抗体の長さや幅を自由に変化させて抵抗値を測定する実験が可能になることを主張している（新鶴田ら, 2019a, 2019b）。特に、長さや幅などのパラメータを定量的に扱うことが容易であるため、再現性を担保した実験が可能であることは、従前の教材と比較して強調すべき点である。

本研究の目的は、視覚的な理解が容易で定量的な実験が可能で実験教材を開発・活用することで、回路における電気抵抗の概念形成や探究的な学習において、新しい学習活動の実現可能性を提案することである。

平成 29 年 (2017)、中学校学習指導要領が改訂され、理科の目標において「探究する能力の基礎」から「探究する力」へと記述が変わった。また、高等学校 (2018 年改訂) においては、「様々な事象に関わり、数学的な見方・考え方や理科の見方・考え方を組み合わせるなどして働かせ、探究の過程を通して、課題を解決するために必要な資質・能力を育成する」として、「理数探究基礎」及び「理数探究」が理数科における科目として新設された。これからの理科教育において、探究の充実がこれまで以上に重視されると考えられる。本研究では、探究的な学習の教材としての活用を視野に入れ、取り扱いが容易で応用性が高く、生徒自身が課題を設定して主体的に探究できる教材を開発する。

II. 開発した教材について

1. カーボン・ペーパーを用いた抵抗器

カーボン・ペーパーとは、カーボンを練り込んだ導電性用紙のことである。本研究で使用したカーボン・ペーパーは、カーボンナノチューブを含むもので、一般的に市販される導電紙と比べて抵抗値は小さく、回路内に配置して LED 等を点灯させることができる。また、普通の紙と同様に扱うことができるため、ハサミやカッターナイフなどを使って自由に、精度良く加工することができる。さらに、温度や湿度変化に対して抵抗値が安定しており、経時変化が少ないという特徴も有する。

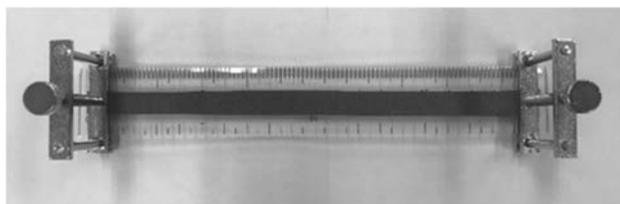


図 1 開発した抵抗器教材の基本的な形状

実験で使用するカーボン・ペーパーの抵抗値は、数 kΩ のオーダーであり、電気の学習でよく用いられる電熱線

やセメント抵抗器 (数 Ω から数 10 Ω のオーダー) と比較して大きい。流れる電流が少ないため、発熱もほとんどない。また、乾電池を用いた実験において危惧される、内部抵抗 (一般に 1 Ω 以下) による影響を考慮する必要はない。

プラスチック製の定規を土台として、その上にカーボン・ペーパーを配置し、両端をピンチコックで固定して抵抗器とした (図 1)。

定規の目盛りに合わせてピンチコックを動かすことで、カーボン・ペーパーの長さを容易に変化させて測定できる。また、幅の異なるカーボン・ペーパー (1.0 cm, 2.0 cm など) を使用すれば、幅の違いによる抵抗の変化を調べる実験が可能である。当然、鉛筆やペンの線と比較して、長さや幅などの値を正確に指定できるため、再現性が担保された実験が容易に実現できる。

電極として、カーボン・ペーパーの幅より大きなピンチコックを使用するのは、カーボン・ペーパー内に一様に電流を流すためである。ピンチコックの代わりに、塗料が塗られていない市販のダブルクリップやゼムクリップを代用することで、コストを抑えることも可能である。

2. 電流チェッカー

電流計や電圧計、デジタルマルチメータは、電流、電圧、抵抗値等を精度良く測定できるため、定量的な実験に必須である。一方で、児童や生徒が定性的な関係性を見いだすために、初歩的な実験を行う場合においては、視覚的・直感的であることが望ましい。そこで、カーボン・ペーパーに流れる電流を簡易的に測定することで、そこからおよその抵抗値を直感的に把握させることを目的として、電流チェッカー (図 2) を開発した。

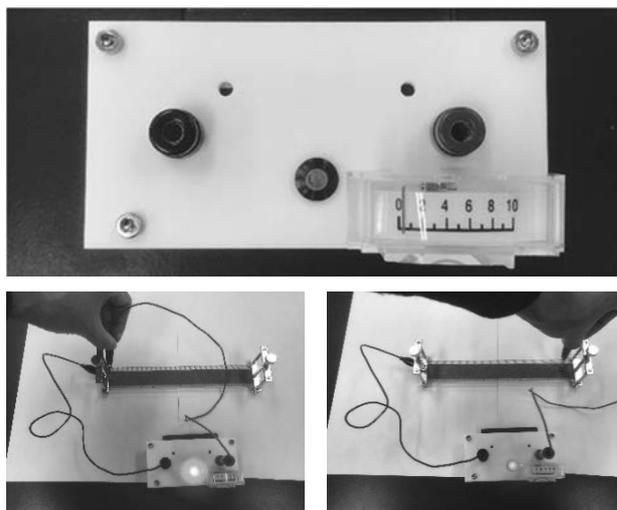


図 2 開発した電流チェッカー

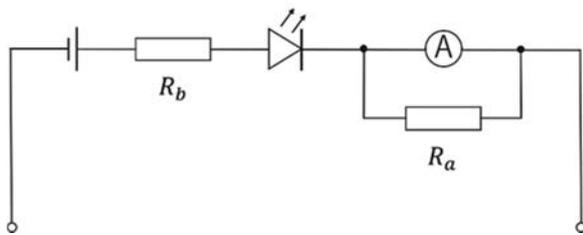


図3 電流チェッカーの回路図

電流チェッカーでは、電流の大きさをLEDの点灯する明るさで表す。電流が大きい場合は明るく点灯し、電流が小さい場合は暗く点灯する(図2)。また、アナログメーターを配置し、電流の大きさを0から10で表すようにした。

図3は電流チェッカーの回路図である。電源は1.5Vの乾電池2個を直列につなぎ、電流チェッカーに内蔵させた。測定のための回路を組む必要がなく実験ができるため、学習内容におけるねらいの本質的な部分の指導に専念することができる。

使用する際は、電流チェッカーの片方の端子を定規の目盛り0のカーボン・ペーパーに合わせ、他方の端子を測定したい長さ配置する。カーボン・ペーパーを流れる電流の大きさに応じてLEDの点灯する明るさが変化するとともに、アナログメーター(図3のA)が振れる。カーボン・ペーパーの形状の変化に伴い、LEDの明るさとアナログメーターの指す値が変化することによって、長さや幅と抵抗値との定性的な関係を実験によって検証することができる。換言すると、カーボン・ペーパーについて、その抵抗の大きさの決定要因を主体的に、実験を通して見いだすことが期待できる。

Ⅲ. 回路における電気抵抗の概念形成への活用

1. 電気抵抗の基本的な概念形成

電気抵抗(または単に抵抗と呼ぶ)は「電流の流れにくさ」を表す物理量である。実験によれば、ある物質中を流れる電流*I*はその両端の電位差(電圧)*V*に比例する。これをオームの法則といい、式で表すと

$$V = RI \quad (1)$$

である。この式(1)における比例定数*R*を、この物質の抵抗という。これを換言すると、1Vの電圧を物質に加えて、1Aの電流が物質中を流れた場合の抵抗が1Ωである。したがって、電圧が一定の条件下では、抵抗は電流に反比例する。

抵抗の大きさは、物質の種類や温度、形状に依存する。物質の種類や温度が変化しない場合、図4のような、一定の幅(太さ)*W*で、長さ*L*のカーボン・ペーパーの両端に電極をつないだ場合の抵抗*R*は次の式、

$$R = \rho_s \frac{L}{W} \quad (2)$$

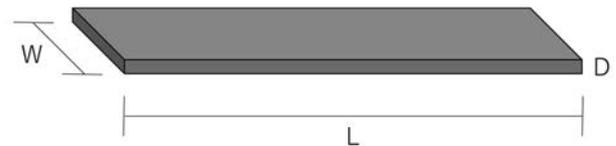


図4 カーボン・ペーパーの模式図

によって表される。ここで、 ρ_s は幅1cm、長さ1cmあたりの抵抗値であり、面抵抗率(またはシート抵抗)と呼ばれる。カーボン・ペーパーの厚さ*D*、電気抵抗率(または抵抗率) ρ とすると、面抵抗率は、 $\rho_s = \rho / D$ である。したがって、抵抗の大きさは物質の長さ比例し、幅(太さ)に反比例する。

実際の指導においては、電流チェッカーを用いた測定により、抵抗の大きさの決定要因が長さや幅であることを実験的に理解させる。さらに、定量的な理解へ深めるために、例えば図5のAからDの4種類のカーボン・ペーパーの抵抗値を予想して小さい順に並べせ、議論させた後で、実験において検証する。

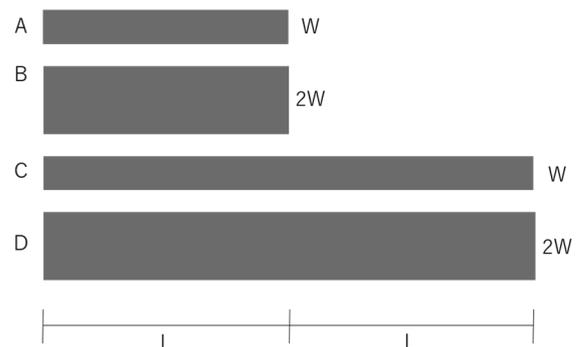


図5 長さや幅を2倍にしたカーボン・ペーパー

Aの抵抗値を*R_A*とすると、B、C、Dはそれぞれ式(2)より、 $R_B = R_A / 2$ 、 $R_C = 2R_A$ 、 $R_D = R_A$ となる。生徒が主体的に実験を行うことで予想が検証され、定量的な関係を学ぶことができる。

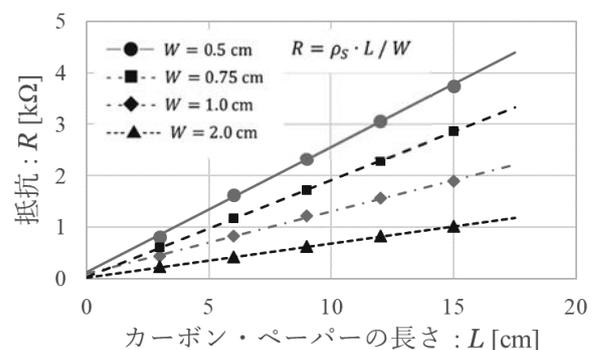


図6 カーボン・ペーパーの抵抗値の長さ依存性

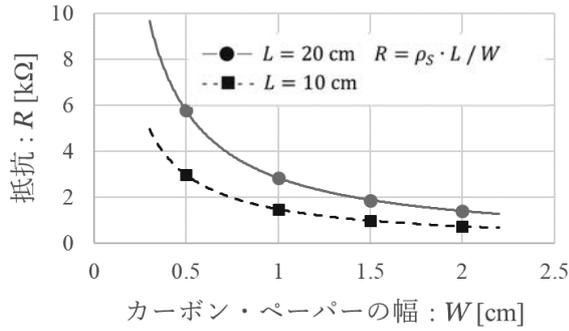


図7 カーボン・ペーパーの抵抗値の幅依存性

図6は、カーボン・ペーパーの幅をそれぞれ、0.5 cm, 0.75 cm, 1.0 cm, 2.0 cm と変化させた場合の、抵抗の長さ依存性をデジタルマルチメータ (Keysight, U1242B) で測定した結果である。測定における有効桁は0.001 kΩ (1 Ω) である (以下の測定において同様)。測定結果は、式(2)が示す比例関係をよく表している。また、直線の傾きから、シート抵抗 ρ_s として約125 Ω/□ を得ることもできる。

図7は、長さ10 cmと20 cmのカーボン・ペーパーにおける、抵抗値の幅依存性を測定した結果である。反比例の関係をよく示しているが、生徒がこのグラフのみから反比例の関係に気付くのは容易でない。そこで、抵抗の逆数(1/R)であるコンダクタンス G という物理量を、

$$G = \frac{1}{R} \quad (3)$$

と表し、「電流の流れやすさ」として定義する。

図8は、図7のデータの縦軸を、抵抗の逆数(コンダクタンス)にしてプロットしたグラフである。コンダクタンス G が幅 W に比例することが、この図から明らかである。したがって、抵抗(電流の流れにくさ)は長さに比例し、抵抗の逆数(電流の流れやすさ)は幅に比例することが実証できる。

高等学校物理では、式(2)を用いて説明し、抵抗の大きさが抵抗体の長さや幅に依存することを理解させる必要があるが、中学校においては数式を用いて説明する必要はない。重要な点は、その概念や本質的な考え方を理解させることである。ところで、中学生に指導するにあたり、コンダクタンスという新しい概念の直接的な導入は生徒を混乱させる可能性がある。そのため、例えば「電流の流れにくさ」である抵抗 R に対して「電流の流れやすさ」という意味で、 R (アール)の逆数(1/R)を \mathcal{Y} (筆者らはこれをルーアと呼ぶことを提案する)として導入するなど、生徒の実態に合わせて丁寧な説明をすることが必須である。本教材を用いれば、抵抗は「電流の流れにくさ」であるとする基本的な概念を、イメージを伴って理解することができる。

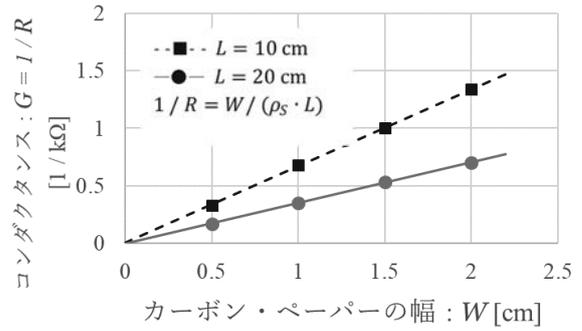


図8 抵抗の逆数(コンダクタンス)の幅依存性

ニクロム線などの従前の教材では、抵抗率が低く、実験において抵抗体の長さによる抵抗値の差を示すためには、数m以上の長さが必要である。また、ニクロム線の断面積の変化は、直径が数mmのオーダーであることに加えて、直径から断面積を計算しなければならないため、直感的な理解が困難であるが、カーボン・ペーパーでは幅(太さ)の変化として視覚的に理解できる。

現在の中学校理科の教科書では、抵抗体の形状による抵抗値の変化については、各社とも発展的な内容としてわずかに記載されており、図による説明のみで実験の記述はない。本教材を用いることで授業において実験を行うことが可能となり、抵抗の概念が初めて導入される中学校において、回路における電気抵抗の基本的な概念を形成するための、有効な活用となる可能性がある。

なお、シート抵抗 ρ_s の決定条件である、カーボン・ペーパーの厚さ D や、抵抗率 ρ においても、複数のカーボン・ペーパーを重ねたり、抵抗率の異なるカーボン・ペーパーと比較したりして測定することで、本教材を用いて式(2)に対する理解をより深めることも可能である。

2. 合成抵抗の概念形成

合成抵抗の指導においては、中学校理科では2つの抵抗器、高等学校物理では3つ以上の抵抗器の接続について取り扱う。高等学校においては、オームの法則の関係式(1)を根拠として、合成抵抗の関係式を数学的に導出する指導法が一般に実施されている。中学校では、合成抵抗の関係式が成り立つことを、実験において検証するが、その理論的な根拠については明確に示されていない。特に、並列接続においては、合成抵抗の関係式が逆数の和で表される理由を説明し、生徒に理解させることは非常に困難であり、大きな課題となっている。

(1) 直列接続の合成抵抗

図9のような、2つの抵抗 R_1 と R_2 を直列に接続した回路を考える。この2つの抵抗を1つの抵抗とみなした

場合、全体の抵抗 R (合成抵抗) は次の式のように表すことができる。

$$R = R_1 + R_2 \quad (4)$$

この関係式(4)は、オームの法則(1)から導かれる。

カーボン・ペーパーを用

いた説明では、オームの法則を明示的に用いる必要はなく、長さの和として理解することができる。例えば、図10に示すような、等しい幅をもつ、長さ L のカーボン・ペーパー2つを直列接続した回路を考える。

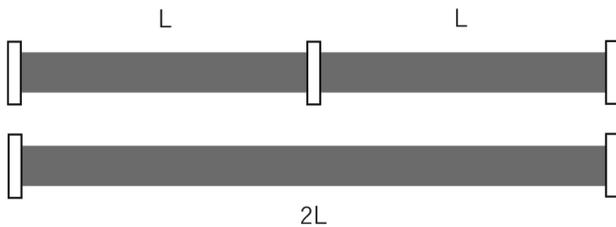


図10 カーボン・ペーパーで示した、2つの同じ抵抗を直列に接続した場合の合成抵抗

図から明らかではあるが、この場合の合成抵抗は、長さ $2L$ のカーボン・ペーパーと等価である。ただし、電極部分は長さに含まない。一般に、直列接続の合成抵抗は、抵抗 R_1 と R_2 それぞれの長さを L_1 , L_2 として、

$$L_S = L_1 + L_2$$

で与えられる長さ L_S の抵抗と等価である。

表1は、幅 1.0 cm、長さ 6.0 cm の抵抗 R_1 と R_2 のカーボン・ペーパーを直列に接続した場合の合成抵抗と、幅 1.0 cm、長さ 12.0 cm のカーボン・ペーパーの抵抗 R_S を測定した結果である。 R_1 と R_2 それぞれの抵抗値の和は、合成抵抗とよく一致しており、本教材が直列接続の合成抵抗における実験教材として活用可能であることを示している。

表1 直列接続の場合の合成抵抗の測定値

$W = 1.0 \text{ cm}$	長さ [cm]	抵抗 [kΩ]
ペーパー R_1	6.0	0.80
ペーパー R_2	6.0	0.84
合成抵抗	6.0 + 6.0	1.64
ペーパー R_S	12.0	1.57

(2) 並列接続の合成抵抗

図11のような、2つの抵抗 R_1 と R_2 を並列に接続した回路を考える。この場合の合成抵抗 R は次の式のように表すことができる。

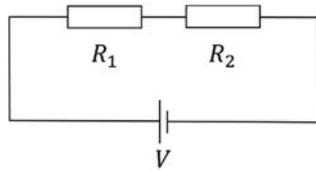


図9 直列接続の回路図

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

この関係式(5)も直列接続の場合と同様に、オームの法則から導かれる。並列接続の公式では、各項が抵抗の逆数になっていることが生徒を大きく困惑させる。

カーボン・ペーパーを用いた説明では、オームの法則を明示的に使う必要はなく、幅の和として理解することができる。例えば、図12に示すような、長さが等しく、幅 W のカーボン・ペーパー2つを並列接続した回路を考える。図から明らかではあるが、この場合の合成抵抗は、幅 $2W$ のカーボン・ペーパーと等価である。



図12 カーボン・ペーパーで示した、2つの同じ抵抗を並列に接続した場合の合成抵抗

一般に、並列接続の合成抵抗は、抵抗 R_1 と R_2 それぞれの幅を W_1 , W_2 として、

$$W_P = W_1 + W_2$$

で与えられる幅 W_P の抵抗と等価である。

表2は、長さ 6.0 cm、幅 1.0 cm の抵抗 R_1 と R_2 のカーボン・ペーパーを並列に接続した場合の合成抵抗と、長さ 6.0 cm、幅 2.0 cm のカーボン・ペーパーの抵抗 R_P を測定した結果である。 R_1 と R_2 の抵抗値を式(5)に代入して得られる合成抵抗の理論値 $R = 0.42 \text{ kΩ}$ は測定値とよく一致しており、 R_P とも一致する。表2の結果から、カーボン・ペーパーは並列接続における合成抵抗の実験教材として有効に活用できると考えられる。

表2 並列接続の場合の合成抵抗の測定値

$L = 6.0 \text{ cm}$	幅 [cm]	抵抗 [kΩ]
ペーパー R_1	1.0	0.82
ペーパー R_2	1.0	0.86
合成抵抗	1.0 + 1.0	0.43
ペーパー R_P	2.0	0.43

さらに、カーボン・ペーパーを用いた説明では、コンダクタンスの考え方を「電流の流れやすさ」として自然な流れで導入することが可能である。抵抗 R_1 と R_2 それぞれのコンダクタンスを G_1 と G_2 とすると、回路全体のコンダクタンス G は、

$$G = G_1 + G_2$$

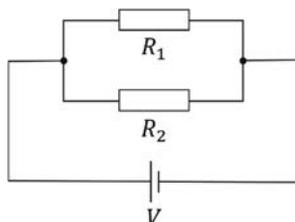


図11 並列接続の回路図

である。これは、式(5)と等価である。コンダクタンスの考え方を導入することで、合成抵抗の関係式が単純化し、「電流の流れやすさ」の和として理解することができる。

IV. 探究的な学習への活用

1. 抵抗の基本的な概念を活用した探究的な学習

カーボン・ペーパーは取り扱いが容易で、応用性が高いことから、探究的な学習の教材としての活用が期待される。例えば、カーボン・ペーパーの抵抗値の規則性を把握した上で「1.0 kΩのカーボン・ペーパーを作製せよ」などの課題を設定し、これまでの学習によって形成された抵抗の概念を活用しながら、カーボン・ペーパーの長さや幅に着目して探究活動を行わせることが想定できる。

既習事項に基づいて仮説を設定し、生徒自らが実験において主体的に検証できる。また、抵抗値は、長さや幅の比のみによって決まることから、同じ抵抗値のカーボン・ペーパーであっても、その形状は様々なものがあることを実感することができる。

ここで重要な点は、予想される「抵抗値を理論的に計算」した上でそれを、「実験的に測定」することができるということである。学んだ概念を活用し、試行錯誤しながら実験することで、探究する力を身に付けると同時に、探究的な学習によって抵抗の概念形成が強化される。

2. 数学的な手法を用いて探究の過程を遂行する学習

高等学校理数科においては、その内容に「数学や理科などに関する課題を設定し、数学的な手法や科学的な手法などを用いて、探究の過程を遂行する」とある。例えば、以下のような学習プログラムを実施することで、課題の探究（追究）や課題の解決の過程を経験させることができる。

(1) 長方形の切断とその合成抵抗

図13のように、同じ形状をもつ2つの長方形のカーボン・ペーパーを用意して左右両端に電極を接続した場合の抵抗と、破線に沿って切り離した場合の全体の抵抗（並列接続における合成抵抗）を比較する。

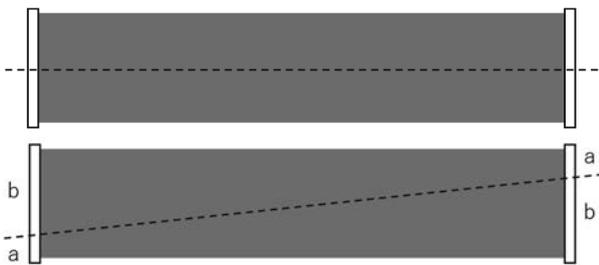


図13 長方形のカーボン・ペーパーを切り離す

図13上のように平行に切断した場合は、並列接続における合成抵抗と同様で、切断前後の抵抗値は等しい。しかしながら、図13下の場合は切断前後の抵抗値は異なり、その抵抗値はパラメータ a , b に依存する。この場合、上底 a , 下底 b の台形2つを並列接続した合成抵抗となる。大きさの等しい2つのカーボン・ペーパーが、切断する角度によって抵抗値が異なる事象を提示することができる。生徒の予想に反する結果は問題意識や探究意欲を高めることにつながる。

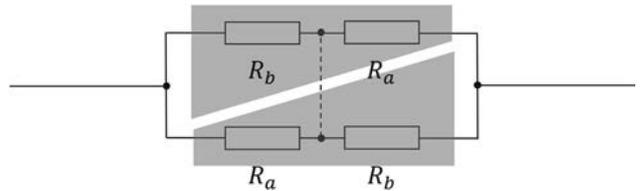


図14 台形の並列接続を簡素化したモデル

台形の幅は a から b へと連続的に変化するため、それに伴い抵抗値も変化する。ところで、 $a < b$ とすると、 a に近い部分の抵抗値は、 b に近い部分の抵抗値と比べて大きい。したがって、台形のカーボン・ペーパーは異なる抵抗（例えば a に近い部分の抵抗を R_a , b に近い部分の抵抗を R_b とする）を直列接続したものと考えることができる（図14）。ただし、 $R_a > R_b$ である。

図14の破線部分に導線をつなぐと、 $R_a \neq R_b$ の場合に電流が流れるが、切断すると当然電流は流れない。つまり、切断前後において全体の抵抗値は変化するということである。一方、図13上の場合には $R_a = R_b$ であり、破線部分に導線をつないでも電流は流れないため、切断前後において全体の抵抗値は等しい。このモデルはブリッジ回路や電位の概念と関連させて理解することができる。

(2) 台形のカーボン・ペーパーの抵抗の計算

長さ（または高さ） L 、上底 a と下底 b ($a < b$) の台形のカーボン・ペーパーの両底辺に電極をつないだ場合の抵抗は、高校数学の範囲で積分計算できる。

長さ Δx 、幅 y のカーボン・ペーパーの抵抗 ΔR は、式(2)より

$$\Delta R = \rho_s \frac{\Delta x}{y}$$

であるから、図15より全体の抵抗 R は、

$$\begin{aligned} R &= \rho_s \int_0^L \frac{1}{a + \frac{b-a}{L}x} dx \\ &= \rho_s \frac{L}{b-a} \log \frac{b}{a} \end{aligned}$$

となる。

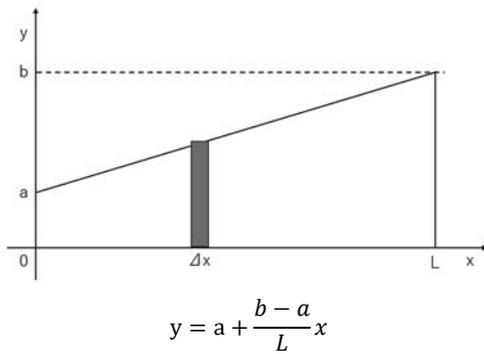


図 15 台形型のカーボン・ペーパー

ここで、 $a \rightarrow b$ のときの極限をとると、 $t = b - a$ として

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow b} R &= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_s \frac{L}{t} \log \frac{b}{b-t} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_s \frac{L}{t} \log \frac{1}{1-\frac{t}{b}} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_s \frac{L}{t} \left[-\log \left(1 - \frac{t}{b} \right) \right] \end{aligned}$$

である。 $t \rightarrow 0$ の場合、マクローリン展開により、

$$\log \left(1 - \frac{t}{b} \right) = -\frac{t}{b} - \frac{1}{2} \frac{t^2}{b^2} - \dots$$

であるから、

$$\begin{aligned} \lim_{a \rightarrow b} R &= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_s \frac{L}{t} \left(\frac{t}{b} \right) \\ &= \rho_s \frac{L}{b} \end{aligned}$$

となり、 $a = b$ の場合は、長方形の式(2)と一致する。

図 16 はシート抵抗 $\rho_s = 125 \Omega/\square$ を用いた測定結果である。測定値と計算値はよく一致し、対数関係を表している。ただし、 a と b の比が大きくなると、カーボン・ペーパー内の電流は x 軸に沿った流れから徐々に外れるため、抵抗値は計算値より大きくなると考えられる。

2つの等しい台形を並列に接続した場合の合成抵抗は、1つの抵抗の1/2倍となるため、

$$\frac{R}{2} = \frac{\rho_s L}{2} \frac{1}{b-a} \log \frac{b}{a}$$

である。この結果は、図 13 の破線に沿って切り離した場合に上の抵抗よりも下の抵抗が大きいことを示している。

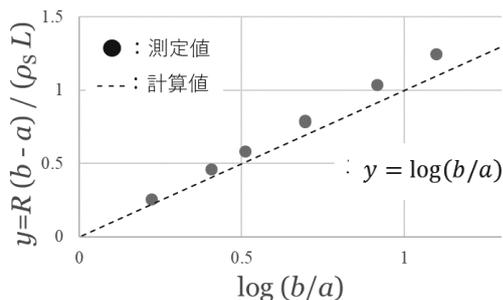


図 16 台形のカーボン・ペーパーの測定値と計算値

3. 近似法の検討を取り入れた探究的な学習

(1) 半輪形のカーボン・ペーパーの抵抗の計算

図 17 のような半輪形のカーボン・ペーパーの両端を電極につないだ抵抗を求める。電流が円周に沿って流れると仮定すると、微小半径 Δr における微小抵抗の積分を試みるが、並列接続となるため単純ではない。そこで、抵抗の逆数であるコンダクタンスを用いた積分を試みる。

カーボン・ペーパーのコンダクタンス G は式(2)より、

$$G = \frac{1}{R} = \frac{W}{\rho_s L}$$

である。微小半径 Δr における微小コンダクタンスは、

$$\Delta G = \frac{\Delta r}{\rho_s \pi r}$$

であるから、全体のコンダクタンスは、

$$G = \frac{1}{\pi \rho_s} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{1}{\pi \rho_s} \log \frac{b}{a}$$

である。したがって、半輪形の抵抗は、

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\pi \rho_s}{\log \frac{b}{a}}$$

となる。コンダクタンスを用いた計算により、単純な積分計算によって抵抗を求めることができる。

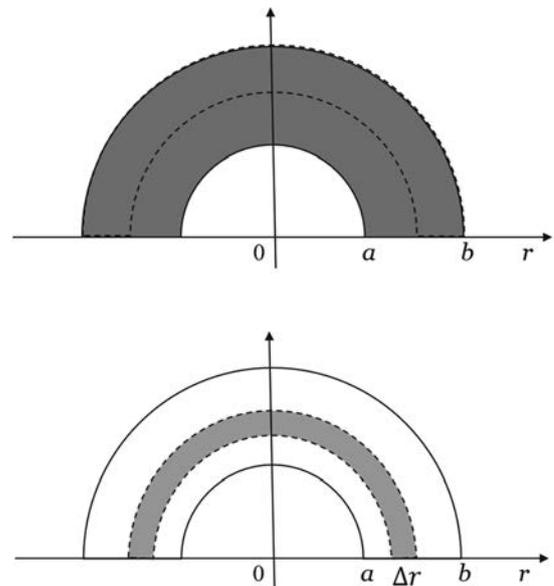


図 17 半輪形のカーボン・ペーパー

(2) 近似法を用いた計算による結果の検討

平均の半径を長辺とする長方形に近似する手法について検討する。モデルが複雑な場合に、簡素化したモデルによる近似法を適用し、その結果を検討することは、探究の過程において重要な科学的手法の1つである。図 18 のような長方形と考え、幅 $(b - a)$ 、長さ $[\pi(b + a)/2]$ として式(2)を用いると、抵抗は、

$$R = \rho_s \frac{\pi \frac{b+a}{2}}{b-a} = \frac{\pi \rho_s}{2} \frac{b+a}{b-a}$$

となる。

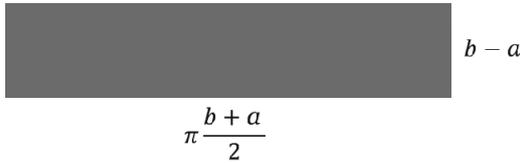


図18 半輪形を長方形に近似する

図19は測定値と近似値, 計算値を比較した結果である。ただし, 横軸は $x = b/a$ とした。また, いずれの手法においても, シート抵抗は $\rho_s = 125 \Omega/\square$ を用いた。測定値は, 円周に沿って電流が流れると仮定した計算値によく一致している。また, 近似値との一致から, 近似法の妥当性について検討することができる。

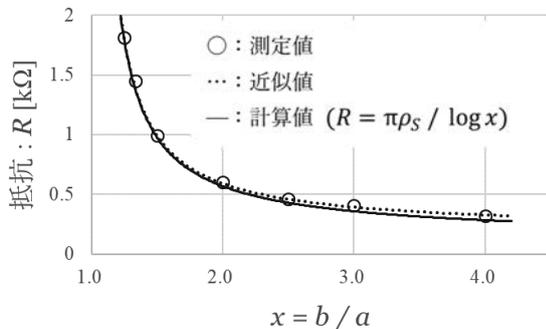


図19 半輪形の抵抗の測定値と近似値, 計算値

4. 電流の流れをイメージする探究的な学習

図20のような平行四辺形の両端に電極を接続した場合の抵抗を, 長方形の抵抗に基づいて解釈する。平行四辺形は, 長さ L , 幅 W の長方形と比較して幅は狭いため, 抵抗は当然大きい。そこで, 幅 $W \sin \theta$ の長方形と比較する。表3は, $L = 4.0 \text{ cm}$, $W = 2.0 \text{ cm}$, $\theta = \pi/3$ の場合の, 幅 W と $W \sin \theta$ の長方形, 平行四辺形の抵抗を測定した結果である。どちらの長方形も平行四辺形に近い値であるが, 完全に一致しているとは言えない。

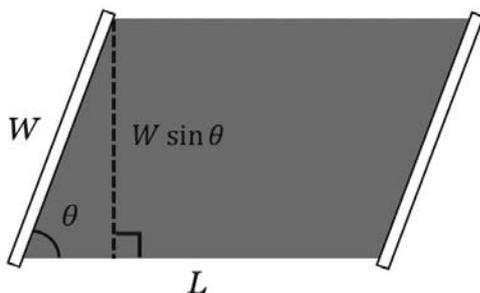


図20 平行四辺形のカーボン・ペーパー

表3 2つのモデルにおける計算値と測定値 [kΩ]

長方形	幅 $W \sin \theta$ の長方形	平行四辺形
0.30	0.35	0.32

($L = 4.0 \text{ cm}$, $W = 2.0 \text{ cm}$, $\theta = \pi/3$)

この実験結果を解釈するために, 電流や電位の概念を導入する。電位を測定すれば等電位線を描くことができ, 等電位線を基に電気力線を描くことができる。

図21は図20の平行四辺形の電位を測定した結果である。両端に 10.0 V の電圧を加え, デジタルマルチメータ (RS PRO, 123-1938) を用いて電位を測定した。左端 0.0 V , 右端 10.0 V として, \circ は 2.0 V , \blacksquare は 4.0 V , \diamond は 6.0 V , \bullet は 8.0 V である。

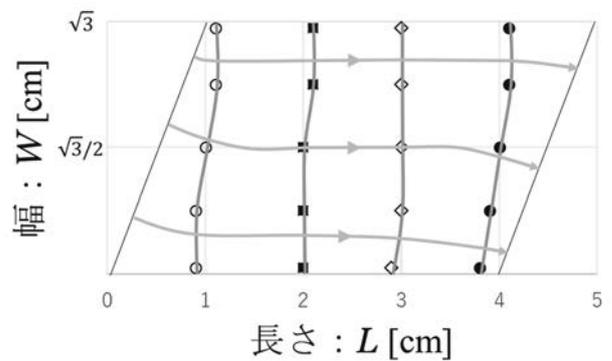


図21 平行四辺形の電位を測定した結果

図21から, 等電位線は長さ L の軸に対してほぼ垂直であることが分かる。電気力線は等電位線に対して垂直であるため, 電流は長さ L の軸に対してほぼ平行に流れていることが分かる。ただし, 電極付近で等電位線はわずかに曲がることから, 電気力線は電極付近で曲がり, 最終的に電極に対して垂直に交わる。つまり, 電流は電極付近で曲がり, 流れる距離を短くすることによって, 抵抗を小さくしている可能性がある。電位測定によって, 電流の流れを可視化し, 平面的にイメージすることが可能となり, 探究の幅が広がる。

V. 教員研修における活用

2019年8月愛知県刈谷市立中学校の教員10名を対象として, 中学校理科「電流とその利用」単元における活用を想定した本教材の研修を行った(図22)。事後アンケートから, 参加したすべての教員が

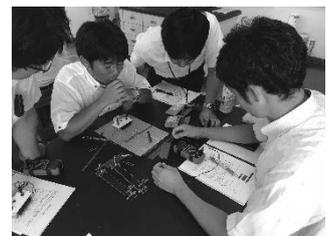


図22 教員研修の様子

本教材に興味をもち, 生徒も興味をもつと思うという回答を得ることができた。また, 授業における活用に対し

て、9名が「ぜひ活用してみたい」、1名が「やや活用してみたい」と回答したことから、今後の授業実践において、積極的に活用される可能性が高いと考えられる。さらに、自由記述欄からは「抵抗の大きさの変化を手軽に実験できる」、「抵抗とは何かについての理解につながる」、「合成抵抗の体験的な理解ができる」など、本研究のねらいと共通する回答を確認することができた。

VI. 結論

カーボン・ペーパーを用いて、電気抵抗の視覚的理解が可能な新規教材を開発した。

本教材は、抵抗体の形状の変化を視覚的に理解することが可能であることに加えて、抵抗値の変化をLEDの明るさによって視覚的に理解することができる。これは、カーボン・ペーパーが市販の導電紙や鉛筆の線などと比較して抵抗値が小さく、回路内に組み込んでLED等を点灯させることができることによって可能となる。

また、鉛筆の線や導電ペンと比較して、形状を統一して加工することが容易であるために、再現性を担保した定量的な実験が可能となる。さらに、回路マーカーのように専用紙を用いる必要がなく、導電ペンのように乾燥させる手間もない。経時変化は少ないため、授業時間内で繰り返し実験をすることが可能である。

本教材の開発により、「抵抗とは何か」という、抵抗そのものを対象とした、基本的な概念形成に関わる実験を含む学習活動が可能となる。また、合成抵抗の指導に活用することで、抵抗の概念を根拠として公式の意味を理解することができる。従前の教材による指導と比較して、オームの法則を用いた数学的な解説を必要とせず、視覚的・直感的な理解が可能となる。特に並列接続の合成抵抗では、新しい概念として「電流の流れやすさ」というコンダクタンスの考え方を導入することで、逆数の和となる根拠を明確に説明することができる。

探究的な学習における活用では、取り扱いが容易で応用性が高く、抵抗体の形状の変化を視覚的に理解しやすいことから、抵抗そのものをテーマとした探究が可能となる。探究の過程では、抵抗の概念に加えて、電流や電位等の概念を組み合わせる活用させた探究活動が展開できる。また、数学的な手法や科学的な手法を組み合わせる、生徒が主体的に課題を設定することができる。

中学校教員を対象とした研修において、本教材の中学校理科「電流とその利用」単元における活用の可能性や、期待される効果に対する関心は高いことが分かった。今後はカーボン・ペーパーの教材としての更なる応用可能性について検討するとともに、授業実践における検証を進めたい。

引用文献

- 有馬朗人, 他 (2018) 『理科の世界 2年』大日本図書.
 藤井清・吉本市 (1977) 「電気回路学習過程における問題点 —形成的評価のための CMI 活用例として—」『物理教育』第 25 巻, 第 4 号, 182-190.
 福山豊 (2000) 「オームの法則の指導について」『物理教育』第 48 巻, 第 6 号, 538-540.
 原田勇希・坂本一真・鈴木誠 (2018) 「いつ, なぜ, 中学生は理科を好きでなくなるのか? —期待—価値理論に基づいた基礎的研究—」『理科教育学研究』第 58 巻, 第 3 号, 319-330.
 石川一樹・鎌田正裕 (2017) 「手描き抵抗と簡易テスターを用いた中学校理科授業の開発」『科学教育研究』第 41 巻, 第 2 号, 221-229.
 川村康文 (1996) 「高校生にみられる小・中学校理科学習の実態と問題点」『物理教育』第 44 巻, 第 4 号, 393-396.
 川村康文 (1997) 「中学校新教育課程で学んだ高校生の小・中学校理科学習の実態と問題点」『物理教育』第 45 巻, 第 4 号, 213-217.
 國友正和, 他 (2018) 『物理基礎』数研出版.
 國友正和, 他 (2018) 『物理』数研出版.
 文部科学省 (2018) 『小学校学習指導要領解説理科編』東洋館出版社.
 文部科学省 (2018) 『中学校学習指導要領解説理科編』学校図書.
 文部科学省 (2019) 『高等学校学習指導要領解説理科編 理数編』実教出版.
 文部科学省・国立教育政策研究所 (2015) 『H27 年度全国学力・学習状況調査報告書 中学校理科』.
 文部科学省・国立教育政策研究所 (2018) 『H30 年度全国学力・学習状況調査報告書 中学校理科』.
 酒井大輔・木田彩佳・原田建治・柴田浩行 (2018) 「導電ペンと筆ペンで描いて学ぶ電気の基礎」『電気学会論文誌 A』第 138 巻, 第 1 号, 30-35.
 新鶴田道也, 岩山勉 (2019a) 「カーボン・ペーパーを用いた電気抵抗の概念形成に有効な新規教材の開発」『第 9 回教科開発学研究会発表論文集』21-24.
 新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉 (2019b) 「カーボン・ペーパーを用いた新規教材の開発」『第 10 回教科開発学研究会発表論文集』15-20.

【連絡先 新鶴田 道也

E-mail : shintsuru3@gmail.com】

Development of Teaching Materials Enable Visual Understanding of Electrical Resistance: Science Education at Lower and Upper Secondary School

Michiya Shintsuruta¹, Hirokazu Okubo¹ and Tsutomu Iwayama²

¹Cooperative Doctoral Course in Subject Development in the Graduate School of Education,
Aichi University of Education & Shizuoka University

²Faculty of Education, Aichi University of Education

ABSTRACT

We developed new teaching materials using carbon paper, which enable visual understanding of electrical resistance. Using carbon paper as an electrical resistance help some students understand of the basic concept of electrical resistance: The value of resistance proportional to the length and inversely proportional to the width. In addition, to helping students to visually understand the electrical resistance change on its form, this teaching materials could be helpful in various situations such as the lesson about the combined resistance and inquiry-based learning in lower and upper secondary school. By quantifying them our new teaching materials enable the experiment which is replicable; in fact, it has been difficult in previous teaching materials. In the learning of combined resistance in lower and upper secondary school, the concept of combined resistance can be understood visually and experimentally based on the relationship between the form of the resistor and the resistance value. In particular, the teaching materials can make students perceive the combined resistance in parallel connection easily by introducing the concept of conductance representing “ease of current flow”. We introduce some teaching plans using our new teaching materials. We used the teaching materials for training of science teachers in lower secondary school. Moreover, the teaching materials expect to be used in new subject, “Risu-Tankyu (which is Inquiry-based learning of Science and Math)”, because carbon paper is easy to handle and highly applicable. Students can calculate resistance value of carbon paper of various forms and measure it.

Keywords

Carbon paper, Electrical resistance, Development of teaching materials, Inquiry-based learning, Science education, Visualization experiment