

【論文】

探究活動「新たな課題を発見する経験」に向けた教材 ー理数探究でカーボン・ペーパーを電気抵抗の教材として活用した実践からー

○大久保 博和¹・新鶴田 道也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

理科・数学の探究活動における「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材として、カーボン・ペーパーの電気抵抗での活用とその有効性を検証した。カーボン・ペーパーは取り扱い易く、自由な形を創ることができ、安定した定量的な実験が可能である。「新たな課題を発見する経験」ができる探究活動は、課題の解決・確認を通して科学の方法と態度の育成に重点を置く探究活動と、課題の設定から考察までのすべてを自身で構想し、それを実施する発展的な探究活動の間に位置する探究活動であると考えられる。カーボン・ペーパーを電気抵抗で活用することは、視覚的な効果や応用性の高さから多様な課題を設定することができ、その結果として多くの「新たな課題」を発見することができる可能性を持っている。本研究により、高等学校での授業実践を通して、カーボン・ペーパーの電気抵抗での活用が、既習理論の確認や課題の解決における教材として有効であること、「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材として「新たな課題」の発見に効果があること、さらに発見した課題が理数探究での発展的な探究活動の事例として活用できることを確認することができた。

キーワード

探究活動、新たな課題を発見する経験、理数探究、カーボン・ペーパー、電気抵抗

I. 問題の所在と研究の目的

平成 28 年 12 月の中央教育審議会答申では、各教科・科目等の内容の見直しにおいて、「生徒自身が観察、実験を中心とした探究の過程を通じて課題を解決したり、新たな課題を発見したりする経験を可能な限り増加させていくことが重要であり、…」を具体的な改善事項として指摘している。この「新たな課題を発見する経験」は従来にはない探究活動の新しい視点といえる。現行の学習指導要領において探究活動に求められていることは、科学の方法の習得と態度の育成である。一般に探究活動による科学の方法の習得は、各科目の教科書に「探究活動」と記載されている実験によってなされている。「物理基礎」は、探究方法を学習する科目として、「物理」はより発展的な探究方法を学習する科目として、さらに「理科課題研究」はこれまでの探究活動の成果を踏まえた主体的な課題の設定が期待される科目として位置づけられている。各社の「物理基礎」の教科書では、「探究活動の進め方」、「探究活動の手順と留意点」など表現の違いはあるが、最初に科学的に探究する方法が記載されている。その後の「探究活動」の項目が付いた具体的な実験も、課題・目標の設定から考察までの具体が指示されており、これらの過程を通して科学の方法が習得できるように記載されている。また、これらの探究活動の目的は、その多くが課題の解決・確認に重点が置かれている。大倉ら(2017)は、探究活動における課題は導入で観察した事象に対する生徒の疑問を基に問いとして設定することが必要であり、探究の

過程においても問いを明確に授業過程に位置づけることが求められると考え、実験・観察が含まれる高等学校化学の学習指導案 28 案について探究の過程を考察した。全 28 案のうち問いを基に「課題」を立てていると捉えられる学習指導案は 3 案のみであり、こうした観点からの実践がほとんどないことがわかったと報告している。「新たな課題を発見する経験」は、問いの設定はするが、それまでに獲得した科学の方法を用いて自由に探究し、その結果に関わらず興味・関心を喚起し、新たな課題を発見する探究活動といえる。大倉ら(2017)の報告にあるように、実践例は少なく、またその問いとそれを基に立てられた課題との関連を分析した研究はこれまで見当たらない。

平成 27 年度の公立高等学校における教育課程の編成・実施状況調査結果では、全日制・普通科での理科課題研究の開設状況は、基礎を付した科目の履修後の 2 年生で 0.6%、3 年生は 2.4%と極めて低く、この科目を通しての探究活動はほとんど実施されていないことが推測される。新しい教科「理数」で、理数探求基礎・理数探求が設置されるが、物理基礎、物理の標準単位数に変化がなく、理科課題研究の現状の実施状況を踏まえると、「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材は、物理基礎・物理の学習範囲内における通常の学習過程で経験できるようにする必要がある。

本研究で利用するカーボン・ペーパーの特徴は、任意の形状に簡単に加工でき、電気抵抗に関する定量的な実験が可能であることである。抵抗体の形状と抵抗値の関係

を定性的、直観的に理解を促す教材として、石川ら(2018)は手描きの鉛筆の線を抵抗として教材化し、その有効性を報告している。また、酒井ら(2018)は、インク顔料に銀粒子を含む導電ペンとカーボンインクが充填された筆ペンを用いた実践を報告している。新鶴田ら(2020)は中学校において、カーボン・ペーパーを抵抗器として用いることで、電気抵抗値と長さ、断面積(カーボン・ペーパーの場合は幅に相当)の関係において再現性のある定量的な実験が可能であり、さらに抵抗の直列・並列接続の合成抵抗の理解において有効となる指導法を提案している。

本研究では、カーボン・ペーパーを用いて、以下の課題1～課題3の実験・考察を行い、「新たな課題の発見を経験」を促すことを目的とした教材としてのカーボン・ペーパーの妥当性・有効性を検討することを目的とした。

課題1 カーボン・ペーパーを用いて、電気抵抗値と長さ・幅の関係を確認する実験を行い、高等学校でこの関係を学習した後に行う実験としての効果を検討する。

課題2 「任意の形をしたカーボン・ペーパーの電気抵抗値の測定」を課題とし、自由な活動過程を観察・検証し、活動から生まれる「新たな課題」を整理・分析する。

課題3 「新たな課題」が、発展的な探究活動が期待される理数探究の事例となり得るかを考察する。

II. 実験の方法

1. 調査対象と実験実施日

調査対象：名古屋市内の公立高等学校第3学年
実施時期：2019年11月(12名)、12月(11名)
実験時間：65分(11月)、50分(12月)

本実践の対象とした生徒は、すでに物理基礎、物理、理科課題研究に相当する科目を履修している。理科課題研究は第2学年で理数探究Ⅰ、第3学年で理数探究Ⅱの科目名に分けて設定されている。本実験は理数探究Ⅱの授業として実施した。実際に実験を行ったのは、3年生で物理、化学、生物から物理を選択した生徒23名で、その生徒を2班に分けて11月と12月に実験を実施した。授業時間は65分間であるが、12月は短縮授業のため授業時間は50分間であった。

2. 実験に用いた器具等

A4サイズのカーボン・ペーパー、プラスチック定規、ピンチコック、カッターナイフ、カッターマット、金属定規、マルチメーター、接続コード、電卓

3. 実験課題と実験方法

以下の(1)～(3)を実験課題として提示して実施した。

- (1) 電気抵抗値と長さ、幅(断面積)との関係の確認
- (2) 指定された電気抵抗値のカーボン・ペーパーの作製と実測値の測定
- (3) 任意の形(四角形に限定)をしたカーボン・ペーパーの作製及び予想値の算出と実測値の測定

実験は参加者を2人ずつ6班に分けて実施した。12月の実験では、生徒数が11名なので、この授業の担当ではない理科教員が1名加わって1班を構成した。

(1)では、図1の実験プリントで、カーボン・ペーパーを用いることで、断面積の代わりに幅、電気抵抗率の代わりにシート抵抗を用いることができることを説明した。

1. 電気抵抗は次の式で表される

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

R [Ω]: 電気抵抗, L [m]: 長さ,
 S [m²]: 断面積, ρ [Ω・m]: 電気抵抗率

2. カーボン・ペーパーの場合

長さ L で、一定の幅 W をもつ、一様な厚さ D のカーボン・ペーパーの抵抗を考える。



抵抗 R を考えると、断面積は、 $S = DW$ であるから、

$$R = \rho \frac{L}{DW} = \rho_s \frac{L}{W}$$

となる。ここで、 $\rho_s = \rho / D$ は、抵抗率 ρ を厚さ D で割ったものであり、**面抵抗率(シート抵抗)** と呼ばれる。単位は Ω/□。カーボン・ペーパーの抵抗値はその長さに比例し、幅に反比例する。

図1 実験でのシート抵抗の説明部分

6班に配布するA4サイズのカーボン・ペーパーからは、すでに長さ15cm、幅1cm、1.2cm、1.5cm、2cm、2.5cm、3cmのうち1種類の長方形が切り取ってある。各班には1種類の長方形とその残りのカーボン・ペーパーを配布した。班では、配布された幅のカーボン・ペーパーを用いて3cm～15cmまで3cmごとの長さの変化に伴う電気抵抗値を測定した。測定を行う際、図2のようにプラスチック製の定規を用い、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て用いた。



図2 実験で用いた抵抗器

処理過程をあらかじめExcelで準備した上で、各班の測定結果を入力し、グラフ化した結果をプロジェクターで投影して、全員で共有することで電気抵抗値と長さ・幅の関係を確認した。

(2)は、(1)の結果を確認した後、その場で「長さ・幅は自由に決めて1kΩのカーボン・ペーパーを作ってください」との課題を与え、あらかじめ与えられた情報をよりどころとして、自由に1kΩの抵抗値になるカーボン・ペ

ーパーを作製して電気抵抗値を測定した。この実験では、(1)の実験で用いた長方形を切り取った残りのカーボン・ペーパーを用いた。これは、カーボン・ペーパーにはシート抵抗に個体差があるので、(1)と(2)の実験を同じシート抵抗のカーボン・ペーパーで実施するためである。

(3)は、(2)の実験と同様の理由で同じカーボン・ペーパーを用いた。四角形(長方形にはこだわらない)の組み合わせを基本として、各班が自由に形を決めて実験を実施した。四角形に限定したのは、(1)で確認、獲得した電気抵抗値と長さ・幅の関係を、予想値を決定する過程の中で有効に用いることができる形状だからである。この実験では、教員は生徒の質問に答える以外は積極的な指導はせず、任意の形の決定、カーボン・ペーパーでの作製、予想値の算出、電気抵抗値の測定、結果から考察まですべて生徒自身の判断で主体的に実施した。

Ⅲ. 検証の方法と検証の観点

実験プリント・実験シートに基づく実験過程、実験結果、自由記述の考察とアンケート用紙の記載内容を基に課題1、課題2の達成状況の検証を行った。また、課題3は課題1、課題2の検証を終えたのち、抽出した新たな課題を事例として著者らが考察を行った。

検証の観点とその目的は以下の通りである。

1. 各実験項目の実施に要した時間

この実験には、抵抗値と長さ・幅の関係を確認する実験と、与えられた課題から自由に探究する活動が含まれている。それぞれの活動の実施に要した時間を明確に把握するため、実験シートにはそれぞれの活動の各実験項目での開始時間を記入させた。この時間を分析することで、それぞれの活動に必要とした時間及び各実験項目での実施方法に関する問題点を検討する。

2. 抵抗値と長さ・幅の関係を確認する方法の妥当性

抵抗値と長さ・幅の関係を確認する実験では、1時間の授業時間内に実施できるように、実験方法、結果の確認方法などで時間短縮を試みた。各班1資料の測定、PCでの結果の処理、プロジェクターを用いた全員での確認などである。考察、アンケートに記入された意見から、時間短縮に用いた方法の問題点について検討する。

3. 自由に作製した図形の分類と新たな課題の抽出

教員の積極的な指導はなく、「四角形の組合せ」という制限だけなので、様々な図形が出てくることが想定される。ここでは、最初に、実験シートに記入されている図形から、四角形であることという限定の下で発案された図形を整理・分類する。次に、抵抗の予想値を求める過程から、算出に用いた理科・数学の見方・考え方を検証する。次に、測定後の考察で提起された問題点、四角形にこだわらず電気抵抗値を調べてみたい形として自由な図形等を記入してもらったアンケートの結果を整理する。これ

らの結果をもとに、新たな課題となりうる項目を抽出し、カーボン・ペーパーを電気抵抗の教材として活用した活動が、「新たな課題を発見する経験」ができる探究活動として有効であるか検討する。

4. 抽出した課題と理数探究との関連

「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材を用いた探究活動で発見された新たな課題は、生徒の興味・関心を引き出し、発展的な探究活動である理数探究の課題として繋がっていくことが望まれる。ここでは、抽出された課題の一つを取り上げ、数学的な見方・考え方や理科の見方・考え方を組み合わせた理数探究の趣旨に沿った事例になり得るかを考察する。

Ⅳ. 実験結果

実験結果は、実験後に提出された実験シート（提出数22）を基に整理・分析した。

1. 実験項目とその所要時間

表1 実験項目と所要時間

実験項目	時間
A. シート抵抗と実験内容の説明	20(分)
B. 抵抗値の長さとの関係	
①長さを変えた抵抗値の測定と入力	8
②全員での確認	4
C. 1k Ω のカーボン・ペーパーの作製	
①カーボン・ペーパーの幅と長さの決定	4
②カーボン・ペーパーの切り取り	7
③抵抗値の測定	5
D. 任意の形をしたカーボン・ペーパーの作製	
①カーボン・ペーパーの形の決定	8
②予想値の算出	6
③カーボン・ペーパーの切り取り	6
④抵抗値の測定	*
⑤考察	*

(放課後、自主的に30分～1時間実験を継続)

表1は、各実験項目とその実験の所要時間である。「A. シート抵抗と実験内容の説明」では、20分と全実験時間の1/3を要している。「B. 抵抗値の長さとの関係」で、全体での確認を終えるまでに32分を要した。「C. 1k Ω のカーボン・ペーパーの作製」以降の所要時間は、各班が自由に活動を進めることができるので、各班の所要時間の平均値で表している。Dの④、⑤の*印は、授業時間内に実験ができず、所要時間が確認できなかったためである。

2. 電気抵抗値の長さとの関係

11月、12月に実施した実験結果からは同様の結果が出ているので、ここでは11月の実験結果を用いて報告する。

図3は、各班に配布した幅の異なるカーボン・ペーパーの長さ3cmごとの抵抗値である。各長さの測定は1回で、測定終了後すぐにPCに入力する。プロジェクターで

投影されたグラフを見て、測定結果に問題があると感じたときのみ再度の測定を行った。

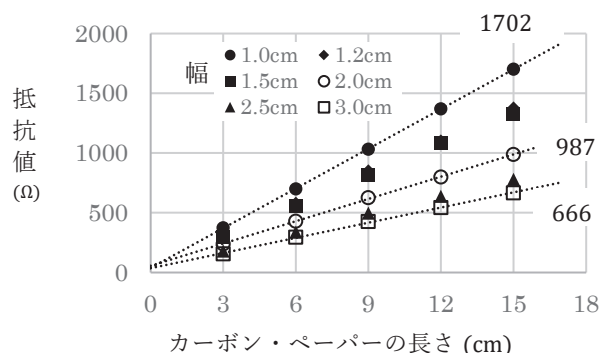


図3 幅の違うカーボン・ペーパーの長さ抵抗値

図3は幅の違うカーボン・ペーパーの長さ抵抗値の関係を示している。縦軸が電気抵抗値で横軸がカーボン・ペーパーの長さである。それぞれの幅で電気抵抗値が長さに比例していることがよくわかる。ただ、幅による違いはわかりにくい。例えば長さ15cmでは幅1.0cmと幅2.0cmでは1/2倍になるはずだが、図3のグラフでは1702Ωと987Ωで1/2になっていない。これはカーボン・ペーパーに個体差があり、表2のように各班のシート抵抗が異なっていたためである。

表2 シート抵抗 (Ω/□)

幅 (cm)	シート抵抗	幅 (cm)	シート抵抗
1.0	110.6	2.0	124.7
1.2	105.5	2.5	125.2
1.5	128.9	3.0	127.8

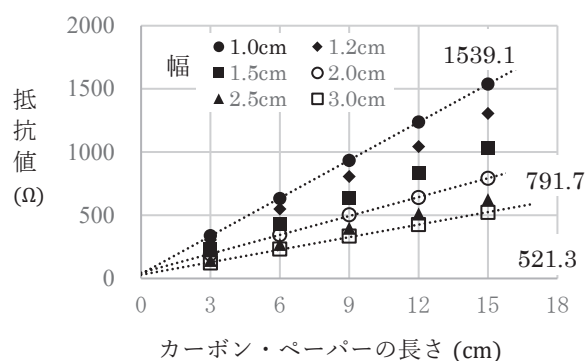


図4 長さとシート抵抗補正をした抵抗値

幅の比較においてこの点を解消するために、どのカーボン・ペーパーもシート抵抗が100Ω/□であると仮定して補正を行った。図4は電気抵抗値を補正した結果で、縦軸が電気抵抗値で横軸がカーボン・ペーパーの長さである。幅1.0cm, 2.0cm, 3.0cmの補正した抵抗値間に1/2, 1/3の関係が確認できる。

図5は、幅1.0cm, 長さ15cmの補正した抵抗値1539.1Ω

を1として、各幅の長さ15cmの補正した抵抗値間で倍率を比較した結果である。横軸はカーボン・ペーパーの幅、縦軸は倍率を示している。このグラフから抵抗値が幅(断面積)と反比例していることがよくわかる。この考察過程では、シート抵抗の異なるカーボン・ペーパー間の比較を行っているため、シート抵抗の平準化が必要である。この後の各班の探究においては、実験方法で記述したように、班にシート抵抗が同じカーボン・ペーパーを配布することで支障なく実験が進められるよう配慮する必要がある。

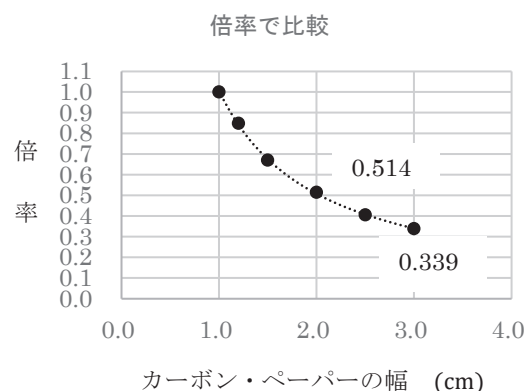


図5 幅の違いによる倍率での比較

3. 1kΩの抵抗値を持つカーボン・ペーパーの作製

各班の実験シートで確認すると、各班が全く同じ過程でこの実験を実施していることが読み取れた。

電気抵抗値と長さ、幅の関係式

$$R = \rho_s \frac{L}{W} \quad \text{に、} R=1\text{k}\Omega, \text{ シート抵抗} \rho_s, \text{ 切りのよい}$$

幅 W の値を代入して長さ L を求め、カーボン・ペーパーを作製していた。

4. 任意の形をしたカーボン・ペーパーの作製

ここでは、2回の実験を合わせた班数12、生徒数23の実験シートから得られた結果を報告する。

生徒が作製した形は図6の5種類に分類できた。

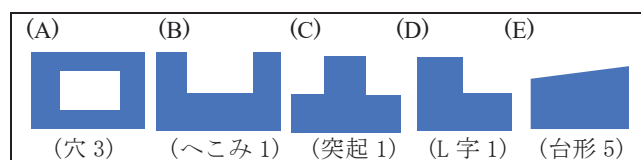


図6 分類に用いた基本の形

各種類の下は(形の名前と作製数)である。以下、本論文ではこれらの形の名前を用いることとする。

電気抵抗値は図の左右の全幅をピンチコックに接続して測定した。あと1班は平行四辺形を作製し、2つの頂点をピンチコックで挟んで測定した。測定部の形が平行四辺形にはならなかったため、ここには加えなかった。

表3は、予想値を求めるときの考え方である。作製し

た形を長方形で分割し、それらの直列・並列接続の組合せを考え、合成抵抗の公式を用いて予想値を求めている。穴、へこみ、突起、L字のいずれもこの考え方で予想値を求めている。一方、台形は、4班が(短辺+長辺)/2の幅を持つ同じ面積の長方形で抵抗値を求め、1班は最初から積分を用いて抵抗値を求めている。

表3 予想値を求めるときの考え方


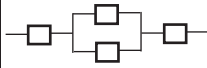

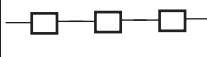










	考え方	抵抗の接続の仕方	求め方
(A) 	直列 並列		合成抵抗 の公式
(B) 	直列		合成抵抗 の公式
(C) 	直列		合成抵抗 の公式
(D) 	直列		合成抵抗 の公式
(E) 	1. 等しい面積の長方形(長さは変えず、幅は両辺の平均値) 2. 積分(長さをx、幅をf(x)として)		

表4は、分類した形状別の予想値と測定値をまとめたものである。予想値は生徒の自由な考察から算出された値であり、測定値は授業後の少ない時間の中で測定された値で、十分な考察と実験から得られた値でないことを考慮していただきたい。

表4 形状別の予想値と測定値

形状	予想値(Ω)	測定値(Ω)	形状	予想値(Ω)	測定値(Ω)
	938	1215		590	586
	1000	1287		282	364
	637	797		3.0×10E3	3.4×10E3
	513	588		1499	1500
	175	253			
	641	655		467	566

どの形状でも、測定値は予想値より大きな値を示している。穴のデータで、予想値590Ω測定値586Ωのケースがあるが、これは予想値の計算ミスで、著者らが見直したところ予想値は454Ωであった。一方、台形では、2班が、測定後に同じ長方形の面積で考えるのは間違いと判断して積分を用いて予想値を求め直そうとしていた。

V. 考 察

実験結果、実験シートの自由記入欄、アンケート(回収数18)の結果を基に課題1、課題2の検証を行う。アンケートは実験終了から1週間後に回収した。アンケートの項目は表5に記載の4項目である。

表5 アンケート項目

1. この実験を通して、電気抵抗について、また電気抵抗と長さや断面積との関係について、これまでのあなたの考え方や理解に変化がありましたか。
2. 実験では四角形の組合せを指定しました。あなたが自由に形を考えることができるなら、どのような形の電気抵抗を調べてみたいと思いますか。あなたが考えた形の図と、その形を選んだ意図を描いてください。
3. この実験を終えて、あなたはさらに電気抵抗に関して探究してみたいという気持ちが生じたでしょうか。もしそうだとしたら、どのようなことを探究したいと思いますか。
4. この実験や授業の進め方について、あなたが感じたことを描いてください。

1. 実験に要した時間分析と実施方法

表1の実施に要した時間から、この実験を1時間の授業時間内に実施することは困難であることがわかった。全ての班が、「任意の形をしたカーボン・ペーパーの作製」で、抵抗値の測定と考察を終了することができず、放課後に実施している。

表6はアンケートの「4. 授業の進め方」の「時間」に関する回答の一部を、表7は同じく「実験の進め方」に関する回答の一部である。時間に関しては、18人中10人が、時間が足りなかったことを挙げている。一方、「考察の時間しだいであるが」、「ディスカッションできる時間がほしい」との意見からは、自由に探究する活動での時間設定の難しさを感じさせられた。

表6 アンケートから「時間」

- ・時間が短くてドタバタしたので、もう少し時間によゆうがある方がいいと思ったので、時間を増やすか、実験をカットしたほうが良いと思った。
- ・ディスカッションできる時間がほしい。
- ・とても考える力が身につく、考えを相談して解を求めるのはとてもいい経験になった。時間が足りなかったけれど……。
- ・50分授業だから仕方がないけど、時間がもう少しほしかった。

(太字は著者記入)

一方、表7のように、電気抵抗値と長さ・幅の関係を確認する実験後に、自由に探究する活動が続く実験の流れについては、肯定的な評価を得ることができた。

表 7 アンケートから「実験の進め方」

- ・実験 1, 2 で与えられた課題をこなして、実験 3 で自分たちが考えて実験するという流れはすごく良いと思いました。
- ・最初に基礎的なものをみんなでやってから発展させていくときに、疑問に思ったことをすぐに実験できて楽しかったです。
- ・最初の説明が丁寧で実験がスムーズに行えた。また、時間を気にしながら行われたのも、我々にとってしんせんみがあった。

カーボン・ペーパーを用いた実験では、断面積の代わりに幅、電気抵抗率の代わりにシート抵抗を用いることなどを説明する 20 分の導入部を省くことはできない。電気抵抗値と長さ・幅の実験では、実験方法、実験結果の確認で時間短縮を試みたがそれでも 12 分かかっている。「1kΩ のカーボン・ペーパーの作製」の 16 分を入れると合計で 48 分の実験時間が必要となる。これらのことから、この実験は「物理」で 2 時間以上の探究活動として実施することが望ましいと考える。あるいは、「物理基礎」の電気抵抗の学習後に確認実験として、幅の考え方やシート抵抗を取り入れたやや発展的な 1 時間の探究活動として実施し、「物理」または「理数探究基礎」で与えられた課題から自由に探究する 1 時間の「新たな課題を発見する経験」ができる探究活動として 2 回に分けて実施することも考えられる。いずれの場合においても、この探究活動の過程で発見された「新たな課題」を基に「理数探究」での発展的な探究活動へつながることが期待される。

2. 抵抗値と長さ・幅の関係を確認する方法の妥当性と生徒への効果

この実験では、授業時間内に実施できるように、各班 1 試料の測定、PC での結果の処理、プロジェクターを用いた全員での確認などで時間短縮を試みた。

表 8 はアンケートの「1.この実験を通しての考え方や理解の変化について」の回答の一部である。

表 8 実験を通しての考え方や理解の変化

- ・体験を通したことによって、理論だけではなく**体感をもって**この関係の考えや**理解が深まった。**
- ・実際自分で変化させながらの実験で、より**直感的に理解が深まった。**
- ・今まで教科書でしか知らなかった事象を、**実物を用いて確認でき、理解が深まった。**
- ・ただの公式として知っていたという程度だったのが**実際に目にして理解が深まった。**
- ・抵抗の公式を**体感できた。**
- ・長さや断面積で実際、抵抗が変わるのが**実感できました。**

(下線、太字は著者記入)

体感、実感、直観的、実物（実際）など 18 人中 13 人がこれらの言葉を、また 16 人が「理解が深まった」、「わ

かった」の言葉で実験の効果を表していた。全体での考察については、「前に表示されたグラフがきれいな直線を描いたとき、とてもうれしく感じたのでぜひ続けてほしい」、「基礎的なものをみんなでやってから」の肯定的な意見が見られた。これらの結果から、この時間短縮を用いた実験方法で実験が実施でき、電気抵抗値と長さ・幅の関係の確認が十分達成できていることがわかった。

一方、抵抗値と幅の反比例を確認する過程で、シート抵抗補正に加えて実行すべき補正がもう一つあることがわかった。測定時の接触抵抗である。

図 7 は、シート抵抗補正をした幅 1.0cm の抵抗値のグラフである。抵抗値を結ぶ直線の式を記入すると、原点を通っていないことがわかる。この切片の値 38.8Ω がピンチコックの抵抗やピンチコックとカーボン・ペーパーの接触部などの測定の際に生じる接触抵抗である。シート抵抗の算出はある 2 点の抵抗値の差を用いて求めているため、切片部分は相殺されて影響を与えなかった。しかしながら、班ごとで接触抵抗は微妙に異なるため、幅の比較においては、測定値から接触抵抗等の補正、さらにシート抵抗補正を行う必要がある。

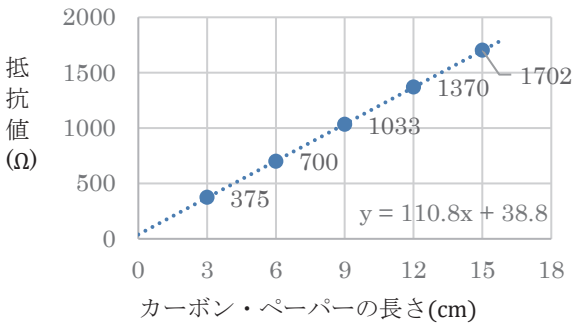


図 7 幅 1cm のカーボン・ペーパーの抵抗値

表 9 は、各幅の長さ 15cm の測定値をシート抵抗補正だけの場合と接触抵抗等の補正、シート抵抗補正の 2 つの補正をした場合の比較である。

表 9 補正值の比較

幅 (cm)	倍率	シート抵抗		接触, シート抵抗	
		補正值	倍率	補正值	倍率
1.0	1.000	1539.1	1.000	1504.0	1.000
1.2	0.833	1306.2	0.849	1251.3	0.832
1.5	0.667	1032.0	0.671	1001.0	0.666
2.0	0.500	791.7	0.514	746.6	0.496
2.5	0.400	623.8	0.405	594.8	0.395
3.0	0.333	521.3	0.339	493.2	0.328

接触抵抗等の補正を加えることで倍率の比較精度がわずかではあるが良くなっていることがわかる。

3. 自由に作製した図形の分類と新たな課題の抽出

自由に作製した図形の分類は図6で示した。ここでは、実験での考察とアンケート結果を基に、四角形以外の図形の選択とその意図、電気抵抗に関してさらに探究したい課題について検証する。

四角形以外の図形は、曲線と立体に分類できた。

[曲線]

- ・曲線で囲まれた図形
- ・曲線で囲まれた部分がくり抜かれた図形


[立体]

- ・カーボン・ペーパーを部分ごとに重ねて厚くして、部分的に厚さが異なる立体
- ・断面が台形のカーボン・ペーパー

曲線では、円、 \sin 、 \cos 、立体では直方体、台形を選択している。その意図に「積分で求めることができそうだから」と書かれている。生徒は獲得している知識を用いて挑戦できるテーマを探しだそうとしている。

一方、電気抵抗に関してさらに探究したい課題については、図形の形から発想された課題、形以外の要素から発想された課題がある。

[図形の形から発想された課題]

- ・同じ面積の穴だが、穴の位置が異なると抵抗値はどう変わるか
 - ・下の二つの図形は同じ抵抗値になるのではないか
- 
- ・穴の大きさの増加とともに抵抗値も増加するのか
 - ・指定された抵抗値を最小面積で作るときの最適の形はなにか
 - ・四角形の辺の角度の変化で抵抗値はどう変わるのか

[形以外の要素から発想された課題]

- ・カーボンの含有量によってどう変わるのか
- ・抵抗と熱（温度）の関係について調べたい
- ・カーボン・ペーパーではなく、媒質を変化させたい

表 10 電流と抵抗を関連づけた課題

- ・長方形に突起をつけたとき、電流の進み方が直進するのみであるなら、突起部は考えなくてもよいのではないか。
- ・同じ面積ならば形が変わっても電流の流れ方は変わらないのでは。
- ・もし電流の道筋がカーボン・ペーパー上で可視化できたら、幅の定義の仕方が確立できるのでは。
- ・電流の流れている部分が小さければ抵抗値は大きくなるはず。
- ・電流の流れは急な角になると流れにくい、同面積の円形と星形で抵抗値の違いを調べたい。
- ・電子はどのように抵抗中を通るのか
- ・電流の流れ方がわかれば、抵抗値を求めることができるのでは。

しかし、最も多かったのは、電流の流れと抵抗を関連づ

けた課題である。表 10 は電流と抵抗を関連づけて提案された課題である。提案された課題からは、抵抗と電流の概念を関連づけて理解しようとしていることがわかる。

このように自由な活動の中で、数多くの新たな課題が提案されたことから、カーボン・ペーパーを電気抵抗の教材として活用することが、「新たな課題を発見する経験」ができる探究活動において有効であることが確認できた。

4. 理数探究での事例考察

ここでは、提案された課題が「理数探究」の事例になり得るかを具体的に考察する。新鶴田ら(2020)は、台形について数学的な方法を用いて近似式を提案し、測定値との比較で良い結果が出ることを示し、探究的な活動が実施可能であることを示している。この報告以外には、これまで平面図形に関する実践的な先行研究は見当たらない。

この考察では、台形の次に選択数の多かった、穴をあけた場合を取り上げる。設定した課題と探究過程は表 11 の通りである。この探究過程での理科の見方・考え方、数学的な見方・考え方では、学習者がこの探究活動を実施する時点で獲得していると考えられる知識・概念を用いた。

表 11 設定した課題と探究過程

設定した課題	
カーボン・ペーパーに穴をあけたとき抵抗値はどのように変化するか	
探究過程	備考
0. 長方形のカーボン・ペーパーに長方形の穴を1つ開けたとき	対象の明確化
1. 穴の位置の変化で抵抗値は変わるか	理科の見方・考え方 数学的な見方・考え方
・位置の変化と抵抗値の関係 ・予想抵抗値と測定値との比較	
2. カーボン・ペーパー上で電流はどのように流れているか	理科の見方・考え方 理科の見方・考え方 数学的な見方・考え方 理科の見方・考え方
・等電位線による観察 ・電流が流れている道幅の決定	
3. 抵抗値を示す式の算出	
4. 予想抵抗値と測定値の比較	

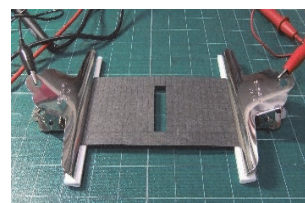


図 8 山型クリップを用いた接触部



探究過程での測定方法を若干変更した。より大きな幅のカーボン・ペーパーで実験ができるように、図 8 のように幅 107mm の山型クリップを用いることにした。そのままでは、クリップの挟み込む位置でカーボン・ペーパーが折れ曲がってしまうので、スライディングレールホルダーのレールをクリップの幅に切ってクリップに差し

込んで用いている。このような変更で、幅広のカーボン・ペーパーを水平に適度な張りで挟むことができた。

4-1. 穴をあける位置で抵抗値は異なるのか

図9のように同じ長方形のカーボン・ペーパーに位置を変えて同じ大きさの穴をあけた場合を比較する。図の下部はそれぞれの名称で、以下この名称を用いる。

穴をあける前に、それぞれのカーボン・ペーパーのシート抵抗と接触抵抗等を必ず求める。抵抗値の比較は、それぞれの測定した抵抗値から接触抵抗等、シート抵抗の補正をした値で比較する必要がある。以下では、測定した抵抗値から接触抵抗等の補正を行い、シート抵抗を $100\Omega/\square$ として補正した後の抵抗値を補正測定値と称して用いる。



図9 穴をあけた位置の異なる長方形

$$R = \rho_s \frac{L}{W} + \rho_s \frac{XY}{W(W-Y)} \quad \dots \textcircled{1}$$

図10 合成抵抗の算出

図10のように、長さ L 、幅 W のカーボン・ペーパーに、長さ X 、幅 Y の穴をあけた場合を考える。

シート抵抗を ρ_s として、各部分を長方形に分割して求めた合成抵抗 R が①式である。①式からは抵抗がカーボン・ペーパーの長さ、幅、穴の長さ、幅、シート抵抗だけで決定し、穴の位置によらないことがわかる。

表12 異なった位置での補正測定値の比較

	中央	左側	上部	左上部
補正測定値 (Ω)	331.41	332.83	333.18	332.48

表12は、カーボン・ペーパー（長さ8cm、幅4cm）に穴（長さ4cm、幅2cm）を開けたときのそれぞれの位置での補正測定値である。ほとんど同じ結果であることから、抵抗値は穴の位置に依存しないことがわかる。

①式を用いて、カーボン・ペーパー（長さ8cm、幅4cm）、穴（長さ4cm、幅2cm）の抵抗値を求めると 300Ω である。この計算値と補正測定値の平均値との差は 32.5Ω になる。①式では、長方形の各部では電流が直進していると考えている。しかし、穴で電流の直進は妨げられる。その分抵抗値が大きくなり、それが 32.5Ω の差になっているのではないかと考えられる。これを確かめるために、まずカーボン・ペーパー上の電流の流れを検証する。

4-2. カーボン・ペーパーでの電流の流れ

4-2-1. 等電位線による観察

図11(a)は、カーボン・ペーパーの左右の端に10Vの電位差を与えた場合の等電位線と、その等電位線と直交するように流れる電流の様子を示している。この図から穴の左右では電流が直進していないことがわかる。図11(b)は穴の角に流れ込む電流の様子を示す。電流がこのような流れていると仮定すると、図11(c)のように穴の左右には電流の流れがない領域が存在すると考えられる。図11(d)のように、電流の流れる部分は、穴の中心部から上下、左右対象になっているので、この部分の抵抗値を求めることでより測定値に近い値を求めることができると考えられる。

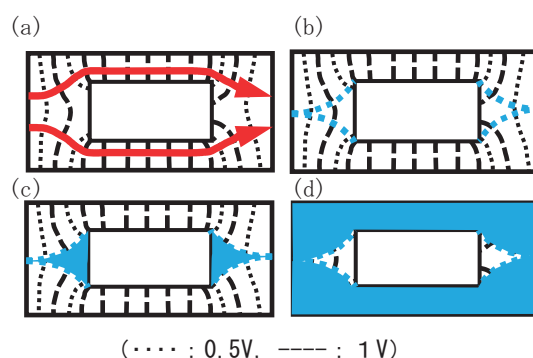


図11 等電位線と流れる電流の様子

4-2-2. 境界線の式を求める

図11(b)から、境界線は穴の中央部を通る直線とカーボン・ペーパーの端との交点を原点として、原点を水平に通過し、その後単調に変化し穴の角を通るように見える。このような性質を持つ最も簡単な曲線として二次曲線が考えられる。

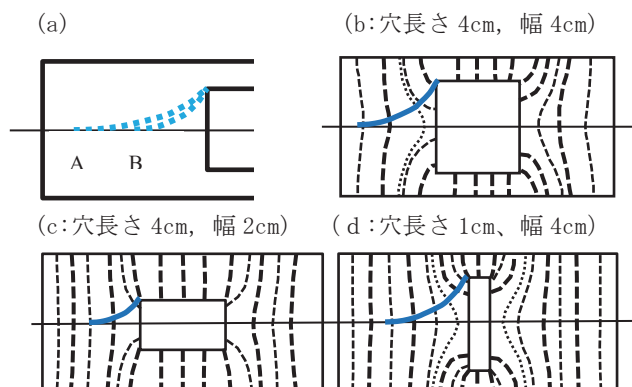


図12 穴の大きさが異なるときの等電位線と境界線

しかし、原点の位置はカーボン・ペーパーの端との交点にあるとは限らず、図12(a)のように端からずれたAやBの位置である可能性もある。これを確認するために、図12(b), (c), (d)のように大きさの等しいカーボン・ペー

パー(長さ 13cm, 幅 6cm)に異なった大きさの穴をあけて等電位線を作図・観察し, 原点の位置を詳細に調べた。

図 12 から (b) と (d) では同じ境界線が描け, (c) は (b), (d) とは異なる境界線になった。すなわち, 穴の幅が違っていると原点の位置が異なることがわかった。また, (b), (c), (d) から, 原点の位置はいずれも穴の端から穴の幅の距離だけ離れた位置を原点とみなすことが適当であると判断することもできた。そこで, この点を原点とする二次曲線を境界線と仮定して抵抗値を求めることにした。

4-2-3. 境界線で囲まれた部分の抵抗値を求める

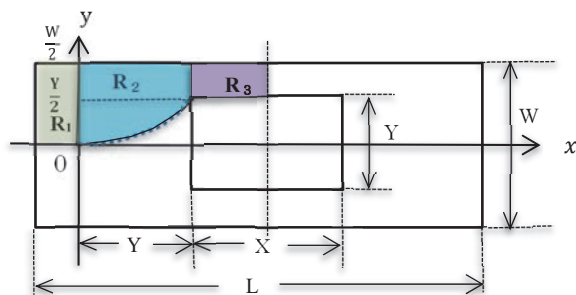


図 13 境界線で囲まれた部分の抵抗

図 13 のようにカーボン・ペーパーと穴, 座標軸を設定すると, 境界線の二次曲線の式は②式になる。

$$y = \frac{1}{2Y}x^2 \quad \cdots \cdots ②$$

電流の流れる部分は穴の中心から上下・左右対称であるので, R_1 , R_2 , R_3 の抵抗を求めて合成すればよい。

まず二次曲線で囲まれた部分の抵抗 R_2 求める。

$$\begin{aligned} R_2 &= \rho_s \int_0^Y \frac{1}{\frac{W}{2} - y} dx \\ &= \rho_s \int_0^Y \frac{1}{\frac{W}{2} - \frac{1}{2Y}x^2} dx = \rho_s \int_0^Y \frac{1}{-\frac{1}{2Y}(x^2 - WY)} dx \\ &= -2Y\rho_s \int_0^Y \frac{1}{(x - \sqrt{WY})(x + \sqrt{WY})} dx \\ &= -2Y\rho_s \int_0^Y \left(\frac{1}{x - \sqrt{WY}} - \frac{1}{x + \sqrt{WY}} \right) \frac{1}{2\sqrt{WY}} dx \\ &= -\rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \left\{ [\ln(x - \sqrt{WY})]_0^Y - [\ln(x + \sqrt{WY})]_0^Y \right\} \\ &= \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \left\{ \ln \frac{Y + \sqrt{WY}}{\sqrt{WY}} - \ln \frac{Y - \sqrt{WY}}{-\sqrt{WY}} \right\} \\ &= \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \left\{ \ln \left(1 + \sqrt{\frac{Y}{W}} \right) - \ln \left(1 - \sqrt{\frac{Y}{W}} \right) \right\} \\ &= \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{Y}{W}}}{1 - \sqrt{\frac{Y}{W}}} \quad \cdots \cdots ③ \end{aligned}$$

$$R_1, R_3 \text{ は } R = \rho_s \frac{L}{W} \text{ より}$$

$$R_1 = \rho_s \frac{\frac{L}{2} - Y - \frac{X}{2}}{\frac{W}{2}} = \rho_s \frac{L - 2Y - X}{W} \quad \cdots \cdots ④$$

$$R_3 = \rho_s \frac{\frac{X}{2}}{\frac{W-Y}{2}} = \rho_s \frac{X}{W-Y} \quad \cdots \cdots ⑤$$

全抵抗 R は, 図 13 の R_1 , R_2 , R_3 を用いて

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2R_1 + 2R_2 + 2R_3} + \frac{1}{2R_1 + 2R_2 + 2R_3}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

これに③, ④, ⑤を代入して

$$R = \rho_s \frac{X}{W-Y} + \rho_s \frac{L - 2Y - X}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{Y}{W}}}{1 - \sqrt{\frac{Y}{W}}} \quad \cdots \cdots ⑥$$

⑥式は, X, Y が 0 のとき $R = \rho_s \frac{L}{W}$ で, 穴のない長方形の抵抗値に等しい。

また, $X=L$ のとき

$$R = \rho_s \frac{L}{W-Y} - \rho_s \frac{2Y}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \left\{ \left(1 + \sqrt{\frac{Y}{W}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{Y}{W}} \right)^{-1} \right\}$$

$$(1+x)^r = 1+rx \text{ より}$$

$$= \rho_s \frac{L}{W-Y} - \rho_s \frac{2Y}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \left\{ \left(1 + \sqrt{\frac{Y}{W}} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{Y}{W}} \right) \right\}$$

$$= \rho_s \frac{L}{W-Y} - \rho_s \frac{2Y}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \left\{ 1 + 2\sqrt{\frac{Y}{W}} + \left(\sqrt{\frac{Y}{W}} \right)^2 \right\}$$

2 次項を削除して

$$= \rho_s \frac{L}{W-Y} - \rho_s \frac{2Y}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \ln \left(1 + 2\sqrt{\frac{Y}{W}} \right)$$

対数部をマクローリン展開し, 2 次以降を無視すると

$$= \rho_s \frac{L}{W-Y} - \rho_s \frac{2Y}{W} + \rho_s \sqrt{\frac{Y}{W}} \cdot \left(2\sqrt{\frac{Y}{W}} \right) = \rho_s \frac{L}{W-Y}$$

これは, 幅 Y の穴で上下に並列に分けられた抵抗値に等しい。 Y の値が W に近づくとき $R = \infty$ となり, 長さ X の穴で左右に分断され電流が流れない状態を示している。⑥式は原点の位置や境界線が二次曲線であると仮定した式ではあるが, 抵抗を表す有力な式であるといえる。

4-2-4. 測定値と⑥式を用いた計算値の比較

カーボン・ペーパーに穴をあけた場合の補正測定値と①式(直列・並列)および⑥式(二次曲線)の計算値を比較し, ⑥式の有効性を検証する。

(1) 穴の位置による抵抗値(表 12) との比較

表 13 は, 表 12 の穴の位置が異なる 4 つの補正測定値の平均値と①式(直列・並列)および⑥式(二次曲線)の計算値である。⑥式は比較的良好な結果を示している。

表 13 穴の位置による抵抗値との比較

補正測定値	直列・並列①式	二次曲線⑥式
332.48 Ω	300.00 Ω	324.65 Ω

(2) 穴の長さの変化による抵抗値の比較

図 14 は、カーボン・ペーパー(長さ 8cm、幅 4cm)の中央に幅 2cm の穴をあけて、その長さを 1cm から 7cm まで変化させたときの補正測定値と計算値を比較したものである。⑥式が実験値をよく示す式であることがわかる。

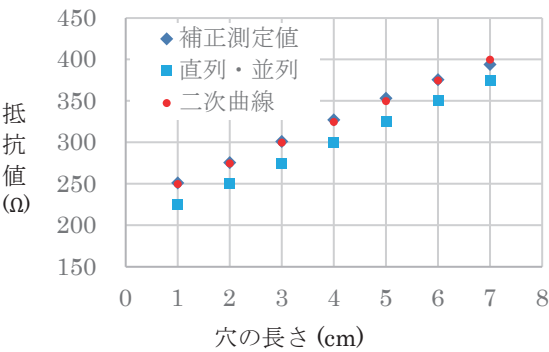


図 14 穴の長さの変化による抵抗値の比較

(3) 穴の幅の変化による抵抗値の比較

図 15 は、カーボン・ペーパー(長さ 8cm、幅 4cm)の中央に長さ 4cm の穴をあけて、その幅を 0.5cm から 3.5cm まで変化させたときを比較したものである。穴の幅が大きくなるとき、①式と補正測定値の差が大きくなるのに対して、⑥式はずれが小さく、実験値をよく示す式であることがわかる。

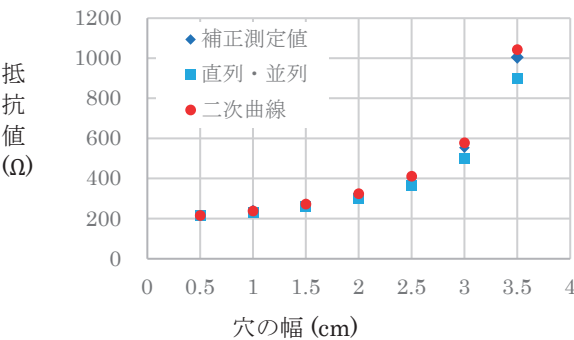


図 15 穴の幅の変化による抵抗値の比較

ここでは、「カーボン・ペーパーに穴をあけたとき抵抗値はどのように変化するか」を課題として、「理数探究」の事例になり得るか考察した。探究過程に沿って、等電位線から電流の流れる路を探り、境界線の式を求め、抵抗の式にたどり着き、測定値との比較からこの式の有効性を示すことができた。それぞれの過程で、「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」方法に基づく探究活動が可能であり、この課題が「理数探究」

の事例となりうることを示すことができた。

VI. 結 論

探究活動での「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材として、カーボン・ペーパーの電気抵抗での活用が極めて有効であることがわかった。電気抵抗値と長さや幅(断面積)との関係を確認・解決する教材として、生徒に実感を伴った理解の深まりを与えることができた。カーボン・ペーパーの取り扱いが容易で、自在に形を創ることができる応用性の高さに着目した「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材として、多様な「新たな課題」を発見することができた。さらに理数探究の発展的な探究活動を進めることができる教材として、理科の見方・考え方、数学的な見方・考え方に基づく探究活動が可能であることを示すことができた。

今後はこの実践で抽出されたそれぞれの「新たな課題」を整理・分析し、理数探究の発展的な探究活動の事例と成り得るか考察を進め、「新たな課題を発見する経験」を促すことを目的とした教材としてのカーボン・ペーパーの有効性を高め、本教材を広く普及させていきたい。

引用文献

中央教育審議会 幼稚園、小学校、中学校、高等学校及び特別支援学校の学習指導要領等の改善及び必要な方策等について(答申) 2016 148

石川一樹・鎌田正裕 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 2017 221-229

文部科学省 高等学校学習指導要領(平成30年告示)解説 理科編 理数編 2019

文部科学省 高等学校学習指導要領(平成21年告示)解説 理科編 2009

文部科学省 平成27年度公立高等学校における教育課程の編成・実施状況調査の結果について 2016

大谷史也・益田裕充・半田良廣 高等学校理科における探究の過程の考察 日本科学教育学会研究会研究報告 Vol.31 No.6 2017 47-50

酒井大輔・木田彩佳・原田建治・柴田浩行 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 2018 30-35

新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉 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― 教科開発学論集 第8号 2020 74-81

【連絡先 大久保 博和
E-mail : memwsq_7@yahoo.co.jp】

Teaching Materials for Inquiry-Based Activities

"Experience to Discover New Assignments"

- The Practice of Using CNT(Carbon Nanotube) Paper as Teaching Materials for Electrical Resistance in Inquiry-Based Study of Science and Mathematics -

Hirokazu Okubo¹, Michiya Shintsuruta¹ 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 examined the utility and effectiveness of CNT paper in the field of electrical resistance as a teaching material that aimed at encouraging "experience to discover new assignments" in inquiry-based activities of science and mathematics. CNT paper is easy to handle, can be made into any shape, and enables stable and highly reproducible quantitative experiments. Inquiry-based activities "experience to discover new assignments" is considered to be an inquiry-based activity located between a basic inquiry-based activity that emphasizes the development of scientific methods and attitudes through solution and confirmation of the assignment, and a progressive inquiry-based activity that carries out everything from assignment setting to consideration by oneself. Utilizing CNT paper in the field of electrical resistance can be to set variety of assignments due to its high visual effect and applicability. As a result, it has the potential to discovered many "new assignments". In this research, through the class practice in high school, we were able to confirm that the utilization of CNT paper in the field of electrical resistance was effective as a teaching material in confirming the theory that had already been learned and in solving assignments. As a teaching material aimed at encouraging "experience to discover new assignments", it was effective in discovering "new assignments". And that the discovered assignments could be used as the case study for exploratory inquiry-based research activities.

Keywords

Inquiry-based activity, Experience to discover new assignments, CNT(Carbon Nanotube) paper,
Inquiry-based study of science and mathematics, Electrical resistance