

博士論文

中等理科教育における CNP 抵抗器教材
の開発とその学習効果の解析

2022年

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

新鶴田 道也

概 要

中等理科教育における電気回路の学習過程に CNP (カーボン・ナノチューブ・ペーパー) 抵抗器教材を活用した学習活動を導入し、これによって可能となる新しい学びと、得られる学習効果について解析した。

第1章では、電気抵抗の基本的な理論を概観し、日本の中等理科教育における内容の取り扱いについてまとめた。現代の日本の理科教育において、電気回路に関する内容は、小学校から高等学校に至るまで系統的に扱われている。その過程の中学校理科「電流とその利用」単元は、抵抗の概念が初めて導入される重要な部分である。しかしながら、「電流とその利用」単元は、以前より理解度や好感度が低いことが課題とされており、現在に至るまで様々な学習状況の調査や教材及び指導方法の開発が盛んに行われてきた領域である。換言すると、認知的側面と社会情動的（非認知的）側面の両面に課題があり、双方を関連させたアプローチを用いて、基礎的な部分から単元全体を見通した、抜本的な改革が必要である。特に最近では、中等理科教育における電気回路の学習全体を見通し、探究活動での活用を視野に入れた、新しい内容の電気抵抗の学習が必要とされている。以上の背景を踏まえて、CNP 抵抗器を新規教材として開発し、中等理科教育における電気回路の学習内容に導入することによって可能となる新しい学びと、その学習効果の解析を行う。本研究の領域は自然系科学（理科）を基軸としており、教育環境学による知見を取り入れた、教科開発学における研究テーマとして位置付けられる。

第2章では、CNP 抵抗器の構造や、教材としての特徴及び性能について分析した。CNP を抵抗体とした新規抵抗器教材を開発・活用することによって、抵抗体の形状を任意に変化させて抵抗値を測定する実験活動が限られた授業時間内において実施可能となった。CNP は中学生や高校生においても簡単に、精度良く加工することができる。また、中学校及び高等学校の授業における活用を想定した簡便な実験装置を用いて、CNP の長さや幅による抵抗値の依存性を測定した結果、想定通りの数値が得られ、理論値とよく一致することが明らかとなった。さらに、積分計算を行うことで、矩形以外の様々な形状の抵抗値を予測することが可能である点や、直列及び並列接続の合成抵抗を学ぶ実験教材としても優れた性能をもつことを確認した。

また、CNP に流れる電流の大小関係を視覚的に把握することを目的として開発した簡易型電流チェッカーを併用することで、中学校において抵抗の2次元的な形状依存性の学習が可能となった。

第3章では、CNP 抵抗器及び簡易型電流チェッカーを活用して、抵抗の形状依存性や合成抵抗に関する実験活動を組み込んだ、新しい学習指導法を開発した。これにより、抵抗の形状依存性を視覚的に理解可能な指導法を提案すると共に、抵抗そのものをテーマとした探究的な学習活動の展開が可能であることを示した。

中学校理科では、CNP 抵抗器の抵抗値を決定する要因を、簡易型電流チェッカーを用いた測定を通して予想し、量的な測定によって仮説を検証する授業を構想した。また、CNP 抵抗器を合成抵抗の実験教材として活用することで、抵抗の形状依存性を根拠とした合成抵抗の新しい指導法を提案した。

高等学校物理基礎及び物理においても、複数枚のCNPを重ねて厚さを変化させることで、抵抗の形状依存性を3次元的に理解できることを示した。また、高等学校理数探究では矩形以外の形状を含めた様々な形状の抵抗値について探究する学習活動を構想することができた。

第4章では、本教材及び指導法の学習効果を実践に基づいて解析した。中学校2校と高等学校2校で実践し、質問紙による学力調査や授業中に生徒が記載したワークシートの記述、授業中の様子など、質的及び量的な手法を組み合わせることで結果を総合的に分析した。その結果、生徒たちは抵抗の形状依存性を擬似的に2次元のイメージを伴って理解し、抵抗とは何かに対する回答や合成抵抗の理解度及び納得度に対して有効に働く可能性が支持された。受講した生徒は、抵抗の形状依存性を理解することで、抵抗の概念は固定的なものではなく、自ら変更可能なものであることを体験することができた。さらに、抵抗の形状依存性を合成抵抗の概念へ応用させることで、電流の通り道の長さや幅という、キャリアが存在する環境に着目することができた。

第5章は研究成果から導かれる結論を述べ、今後の中等理科教育における示唆を得ることで総括とした。本研究によって示された、中等理科教育における電気回路のカリキュラムにCNP抵抗器を導入することによって可能となる新しい学びとは、

- (1) 中学校理科における2次元的な抵抗の形状依存性の理解とこの概念を活用した合成抵抗の学習
- (2) 高等学校物理基礎または物理における2次元的な抵抗を3次元的に拡張した抵抗の形状依存性の理解
- (3) 高等学校理数探究における微小部分の抵抗値を積分することによる任意形状の抵抗値の探究

である。

以上の新しい学びは、認知的側面と社会情動的側面の双方を組み合わせたアプローチが可能であり、新しい電気回路のカリキュラムの開発に寄与する可能性がある。これは、中学校から高等学校を通じた学習過程における、抵抗に関する概念の段階的な拡張が可能となる可能性を示唆しており、CNP抵抗器の導入に関する積極的な議論を進めることは有意義であると考えられる。今後は、多様な教材やモデルの差異に着目し、中等理科教育における電気回路の最適なカリキュラムの開発を進める予定である。

目 次

概 要	i
目 次	iii
表目次	v
図目次	vii
付録目次	ix
第 1 章 序論 – 電気抵抗の概念形成と既存の教材における問題点 –	1
1.1 電気抵抗とは	2
1.2 日本の中理科教育における電気抵抗の取り扱い	4
1.3 中理科教育における電気抵抗に関する指導法の変遷	6
1.4 電気抵抗に関する学力の現状と課題	8
1.5 既存の電気抵抗器教材とその課題	10
1.6 本研究テーマにおける教科開発学としての位置付け	16
1.7 本論文の構成	18
第 2 章 新規教材の開発	19
2.1 CNP 抵抗器	20
2.2 矩形の CNP の電気抵抗値	21
2.3 台形の CNP の電気抵抗値	25
2.4 半輪形の CNP の電気抵抗値	28
2.5 複数枚を重ねた CNP の電気抵抗値	30
2.6 CNP の合成抵抗	32
2.6.1 直列接続の合成抵抗	32
2.6.2 並列接続の合成抵抗	34
2.7 長方形の切断とその合成抵抗	36
2.8 電流の流れのイメージをもつための電位の測定	37
2.9 簡易型電流チェッカー	39
第 3 章 新指導法の開発	41
3.1 中学校理科「電流とその利用」	42
3.2 高等学校物理基礎「電気」	50
3.3 高等学校理数探究	51
3.4 CNP の物質的特性に着目した授業内容	52

第4章 指導法の実践と効果の検証	53
4.1 中学校理科「電流とその利用」実践1	54
4.1.1 授業実践と分析方法	54
4.1.2 検証1-1	57
4.1.3 検証1-2	61
4.1.4 検証1-3	63
4.1.5 実践1の考察	64
4.2 中学校理科「電流とその利用」実践2	66
4.2.1 授業実践と分析方法	66
4.2.2 検証2-1	69
4.2.3 検証2-2	65
4.2.4 検証2-3	71
4.2.5 実践2の考察	71
4.3 高等学校物理基礎「電気」	73
4.4 高等学校理数探究	76
第5章 結論	79
文 献	82
付 録	86
謝 辞	88

表目次

表 1.1: 電気抵抗器教材の比較	14
表 2.1: 同じ CNP を 1 回ごとに取り外して抵抗値を測定した結果	22
表 2.2: 同じ形状に加工された CNP の抵抗値とシート抵抗値	22
表 2.3: グラフの傾きから計算したシート抵抗値	23
表 2.4: 直列接続の場合の合成抵抗の測定値	33
表 2.5: 並列接続の場合の合成抵抗の測定値	35
表 2.6: 2 つのモデルにおける計算値と測定値 [$k\Omega$]	38
表 3.1: 大日本図書出版の教科書における「電流とその利用」単元の構成と指導のねらい	42
表 3.2: 第 1 章「電流と回路」(14 時間) の授業時間と指導項目 (大日本図書)	43
表 3.3: 抵抗の形状依存性を学習する授業 1 の流れ	46
表 3.4: 構想した合成抵抗を学習する授業 2 の流れ	48
表 3.5: 「物理基礎」試行的授業の流れ	50
表 3.6: 「理数探究」試行的授業の流れ	51
表 4.1: 授業実践と質問紙調査の流れ	54
表 4.2: 質問紙の内容	56
表 4.3: 質問項目 2 の回答例と評価	57
表 4.4: 検証 1 - 1 の質問紙調査結果 (マン・ホイットニーの U 検定による分析)	58
表 4.5: 実験群 1 で実施した授業 1 の発話記録 (抜粋)	59
表 4.6: 実験群 1 で実施した授業 2 の発話記録 (抜粋)	60
表 4.7: 実験群 1 生徒の授業後の感想 (まとめ)	61
表 4.8: 検証 1 - 2 の質問紙調査結果 (マン・ホイットニーの U 検定による分析)	61
表 4.9: 実験群 2 で実施した授業 2 の発話記録 (抜粋)	62
表 4.10: 実験群 2 生徒の授業後の感想 (まとめ)	63
表 4.11: 検証 1 - 3 の質問紙調査結果 (マン・ホイットニーの U 検定による分析)	64
表 4.12: 設定した群と実践の条件	66
表 4.13: 事後及び授業 2 か月後 (遅延) に実施した質問紙調査の内容	69
表 4.14: 検証 2 - 1: CNP 抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群の比較	70
表 4.15: 検証 2 - 2: セメント抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群の比較	70
表 4.16: 検証 2 - 3: CNP 抵抗器を用いて合成抵抗と形状依存性を学んだ 2 群の比較	71
表 4.17: 実験結果の考察で電気抵抗値の形状依存性をワークシートに正しく記述できた 生徒の割合 (生徒数: 114 名)	74
表 4.18: 「物理基礎」授業後アンケートの内容	74
表 4.19: 抵抗の形状依存性の公式の正答率 (試行的授業実施 1 週間後の調査結果)	74

表 4.20 : 「物理基礎」 試行的授業実施後における感想の抜粋 (質問項目 3)	75
表 4.21 : 「理数探究」 授業後アンケートの内容	77

図目次

図 1.1：オームの法則	2
図 1.2：長さ L [m], 断面積 S [m^2]の導線	3
図 1.3：直方体（矩形）の抵抗体の模式図	3
図 1.4：初等中等理科の「エネルギー」を柱とする内容構成	5
図 1.5：中学校学習指導要領の理科における抵抗に関する記述の抜粋	6
図 1.6：昭和 56 年初版発行の教科書におけるパチンコ台モデルを用いた説明図	7
図 1.7：合成抵抗と関連した抵抗の形状依存性に関する教科書の記述	8
図 1.8：鉛筆を用いた手描き抵抗	11
図 1.9：エレファンテック（旧 AgIC）社の回路マーカー（Circuit Marker）	12
図 1.10：Bare conductive 社の導電ペン（Electric paint）による描画の例示と LED の発光	13
図 1.11：教科開発学における研究目標と養成する能力	18
図 2.1：CNP（カーボン・ナノチューブ・ペーパー）	20
図 2.2：開発した CNP 抵抗器教材の基本的な形状	21
図 2.3：CNP の抵抗値を測定する様子	21
図 2.4：CNP の抵抗値の長さ依存性	23
図 2.5：CNP の抵抗値の幅依存性	24
図 2.6：抵抗の逆数（コンダクタンス）の幅依存性	24
図 2.7：台形状にカットされた CNP	26
図 2.8：台形状の CNP の測定値と理論値の比較	27
図 2.9：台形状の CNP の測定値と理論値の比較（横軸は対数）	28
図 2.10：半輪形の CNP	29
図 2.11：半輪形を長方形に近似する	30
図 2.12：半輪形の抵抗の測定値と近似値，計算値	30
図 2.13：同じ形状の CNP を N 枚重ねて 1 つの抵抗体を表す	30
図 2.14：CNP の抵抗値の枚数（断面積）依存性	31
図 2.15：CNP のコンダクタンスの枚数（断面積）依存性	31
図 2.16：直列接続の回路図	32
図 2.17：CNP 抵抗器で示した，2 つの同じ抵抗を直列に接続した場合の合成抵抗	33
図 2.18：並列接続の回路図	34
図 2.19：CNP 抵抗器で示した，2 つの同じ抵抗を並列に接続した場合の合成抵抗	35
図 2.20：長方形の CNP を平行に切り離す	36
図 2.21：長方形の CNP を斜めに切り離す	36

図 2.22：台形の並列接続を簡素化したモデル	37
図 2.23：平行四辺形の CNP	38
図 2.24：平行四辺形の電位を測定した結果	38
図 2.25：開発した簡易型電流チェッカー	40
図 2.26：電流チェッカーの回路図	40
図 2.27：長さ 3.0 cm の CNP を測定する様子	40
図 2.28：長さ 19.0 cm の CNP を測定する様子	40
図 3.1：教科書（有馬ら, 2018）における合成抵抗の指導展開の構造	45
図 3.2：新指導法が目指す授業展開の構造	45
図 3.3：中学生が授業の中で測定した CNP の幅と抵抗値の逆数の関係	47
図 3.4：CNP 抵抗器で直列合成抵抗を測定する様子	49
図 3.5：CNP 抵抗器で並列合成抵抗を測定する様子	49
図 4.1：実験群 1 で授業 1 を実践している様子	58
図 4.2：事前テスト	68
図 4.3：生徒による実験結果の記録（左：長さ依存性，右：断面積依存性）	74
図 4.4：抵抗の形状依存性の公式の納得度（試行的授業実施 1 週間後の調査結果）	75
図 4.5：台形の抵抗値を積分計算によって求める生徒の記述	77
図 4.6：質問項目 1 の集計結果	77
図 4.7：質問項目 2 の集計結果	77

付録目次

付録 A：授業 1 で使用したワークシートと記入例	86
付録 B：授業 2 で使用したワークシートと記入例	87

第 1 章

序 論

—電気抵抗の概念形成と既存の教材における問題点—

第1章

序論

—電気抵抗の概念形成と既存の教材における問題点—

1.1 電気抵抗とは

電気抵抗とは「電流の流れにくさ」を表す物理量であり、「電気」を省略して単に「抵抗」と表すことも多い。実験によれば、導線を通る電流 I は導線の両端の電位差（電圧） V に比例する（図 1.1）。これをオームの法則（Ohm's law）といい、式で表すと

$$V = RI \quad (1.1)$$

である。式(1.1)における比例定数 R は、この物質の抵抗（resistance）であり、単位はオーム（記号： Ω ）である（原，1988）。換言すれば、1 V の電圧を物質に加えて、1 A 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ため、抵抗が大きいほど、電流の値は小さくなる（流れにくい）。

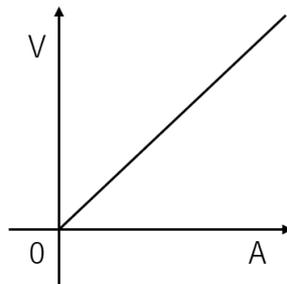


図 1.1：オームの法則

図 1.2 のような導線を考えると、抵抗 R [Ω] は導線の長さ L [m] に比例し、断面積 S [m^2] に反比例するため、

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1.2)$$

と表すことができる。本論文では、式(1.2)が示す関係性を、抵抗の形状依存性と呼ぶ。ここで、比例定数 ρ は導線の方法（物質）と温度のみによって決まる定数であり、電気抵抗率（または単に抵抗率， resistivity）と呼ばれる。換言すれば、抵抗率は長さ 1 m で断面積が 1 m^2 の物質の抵抗値を示す。つまり、形状の等しい抵抗体においては、抵抗率が大きい物質ほど単位長さ・単位断面積あたりの抵抗が大きく、電流を通しにくいと言える。抵抗率の単位はオームメートル（記号： Ωm ）である。

例えば、ニッケル (Ni) とクロム (Cr) の合金であり、電流が流れた際の発熱体としてよく用いられるニクロム線の抵抗率は、物質の温度を 0°C とした場合、 $1.1 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$ である (国立天文台, 2019)。この値は、同温 (0°C) のエナメル線 (銅線を樹脂で被覆したもの) の抵抗率 $1.6 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (国立天文台, 2019) の 100 倍程である。すなわち、同じ断面積、同じ長さあたりの抵抗値を比較した場合、ニクロム線はエナメル線の約 100 倍の抵抗値を示すことを意味する。

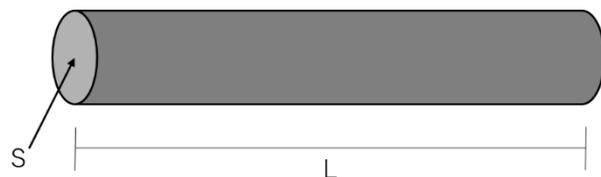


図 1.2 : 長さ L [m], 断面積 S [m^2] の導線

導線以外にも抵抗体は存在する。例えば、図 1.3 のような直方体の抵抗体の左右両端に電極をつないで電位差を与えた場合の抵抗 R [Ω] を考える。抵抗体の幅 (太さ) W [m], 長さ L [m], 厚さ D [m] とすると、断面積 S [m^2] は DW であることから、式(1.2)は、

$$R = \rho \frac{L}{DW} \quad (1.3)$$

$$= \rho_s \frac{L}{W} \quad (1.4)$$

となる。ここで、 $\rho_s = \rho/D$ は面抵抗率 (またはシート抵抗, sheet resistance) と呼ばれる物理量である。シート抵抗とは、抵抗体を厚さ一定のシートと仮定した場合、このシートの単位面積 (例えば $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ の正方形) あたりの抵抗である。シート抵抗は、抵抗率 ρ [Ωm] を厚さ D [m] で除した物理量であるため抵抗と同じ次元をもつ。そこで、抵抗との混同を避けるために、シート抵抗の単位をオーム (記号: Ω) とせず、慣例的にオーム毎スクエア (記号: $\Omega/\text{sq.}$) としている場合が多い。式(1.4)は、抵抗体を厚さ D [m] が一定で薄い 2 次元的な形状 (矩形) と見た場合、抵抗値が抵抗体の長さに比例し、幅に反比例することを表している。

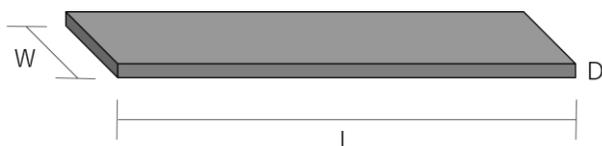


図 1.3 : 直方体 (矩形) の抵抗体の模式図

オームの法則（式 1.1）は、物質の 2 点間に電位差を与えた際に流れる電流と電圧の関係性を示している。物質中を電流が流れるということは、電荷を持った粒子が外部から加えられた電場によって移動することである。なお、ここでの電荷を持った粒子はキャリア（carrier）と呼ばれ、電子、イオン、正孔などが該当する。

一定の断面積 S [m²] をもつ一様な物質中を流れる電流を I [A]、キャリアの電荷量を q [C]、単位体積あたりのキャリアの数を n [1/m³]、キャリアの平均の速さを v [m/s] とすると、電流 I は、ある断面を単位時間に通過する電荷量として定義されるため、

$$I = vSnq \quad (1.5)$$

である。また、キャリアの平均の速さ v は電場の強さ E に比例するため、

$$v = \mu E \quad (1.6)$$

と表される。ここで、比例定数 μ は移動度（mobility）と呼ばれ、物質中でのキャリアの動きやすさを表す物理量である。物質の長さを L 、その両端にかかる電圧を V とすると、

$$E = \frac{V}{L} \quad (1.7)$$

である。これらの関係式（1.5, 1.6, 1.7）から、

$$V = \frac{L}{nq\mu S} \cdot I \quad (1.8)$$

を得ることができ、これとオームの法則の関係式(1.1)を比較することで、

$$R = \frac{L}{nq\mu S} \quad (1.9)$$

が得られる。この式の右辺において、物質固有の値となる $1/nq\mu$ を ρ 、すなわち、

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \quad (1.10)$$

とおくと、式(1.2)と一致する。

1.2 日本の中等理科教育における電気抵抗の取り扱い

図 1.4 は、日本の初等中等理科教育において「エネルギー」を柱とする内容構成（文部科学省、2019a）を示している。小学校理科では、第 3 学年「電気の通り道」、第 4 学年「電流の働き」、第 5 学年「電流がつくる磁力」、第 6 学年「電気の利用」と、理科を実施する全ての学年において、電気に関わる学習内容が配置されている。中学校理科では、「電流」と「電流と磁界」を合わせた単元である第 2 学年「電流とその利用」が、電気について学習する主な単元である。この単元では、小学校理科の 4 年間で獲得した電流の概念を活用して、電圧や抵抗、電力、電力量、熱量、エネルギーなどの概念について初めて学習する。特に、抵抗の考え方は他の概念や高等学校物理基礎や物理で学習する内容につながる概念であり、これが導入される本単元の重要性を強調している。なお、中学校第 3 学年ではエネルギーの変換や保存、エネルギー資源について学習する。

校種	学年	エネルギー			
		エネルギーの捉え方	エネルギーの変換と保存	エネルギー資源の有効利用	
小学校	第3学年	<ul style="list-style-type: none"> 風とゴムの力の働き <ul style="list-style-type: none"> 風の力の働き ゴムの力の働き 	<ul style="list-style-type: none"> 光と音の性質 <ul style="list-style-type: none"> 光の反射・集光 光の当て方と明るさや暖かさ 音の伝わり方と大小 	<ul style="list-style-type: none"> 磁石の性質 <ul style="list-style-type: none"> 磁石に引き付けられる物 異極と同極 	<ul style="list-style-type: none"> 電気の通り道 <ul style="list-style-type: none"> 電気を通すつなぎ方 電気を通す物
	第4学年		<ul style="list-style-type: none"> 電流の働き <ul style="list-style-type: none"> 乾電池の数とつなぎ方 		
	第5学年	<ul style="list-style-type: none"> 振り子の運動 <ul style="list-style-type: none"> 振り子の運動 	<ul style="list-style-type: none"> 電流がつくる磁力 <ul style="list-style-type: none"> 鉄心の磁化、極の変化 電磁石の強さ 		
	第6学年	<ul style="list-style-type: none"> てこの規則性 <ul style="list-style-type: none"> てこのつり合いの規則性 てこの利用 	<ul style="list-style-type: none"> 電気の利用 <ul style="list-style-type: none"> 発電（光電池（小4から移行）を含む）、蓄電 電気の変換 電気の利用 		
中学校	第1学年	<ul style="list-style-type: none"> 力の働き <ul style="list-style-type: none"> 力の働き（2力のつり合い（中3から移行）を含む） 光と音 <ul style="list-style-type: none"> 光の反射・屈折（光の色を含む） 凸レンズの働き 音の性質 			
	第2学年	<ul style="list-style-type: none"> 電流 <ul style="list-style-type: none"> 回路と電流・電圧 電流・電圧と抵抗 電気とそのエネルギー（電気による発熱（小6から移行）を含む） 静電気と電流（電子、放射線を含む） 電流と磁界 <ul style="list-style-type: none"> 電流がつくる磁界 磁界中の電流が受ける力 電磁誘導と発電 			
	第3学年	<ul style="list-style-type: none"> 力のつり合いと合成・分解 <ul style="list-style-type: none"> 水中の物体に働く力（水圧、浮力（中1から移行）を含む） 力の合成・分解 運動の規則性 <ul style="list-style-type: none"> 運動の速さと向き 力と運動 力学的エネルギー <ul style="list-style-type: none"> 仕事とエネルギー 力学的エネルギーの保存 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギーと物質 <ul style="list-style-type: none"> エネルギーとエネルギー資源（放射線を含む） 様々な物質とその利用（プラスチック（中1から移行）を含む） 科学技術の発展 	<ul style="list-style-type: none"> 自然環境の保全と科学技術の利用 <ul style="list-style-type: none"> 自然環境の保全と科学技術の利用<第2分野と共通> 	
高等学校	物理基礎				
	<ul style="list-style-type: none"> 運動の表し方 <ul style="list-style-type: none"> 物理量の測定と扱い方 運動の表し方 直線運動の加速度 様々な力とその働き <ul style="list-style-type: none"> 様々な力 力のつり合い 運動の法則 物体の落下運動 力学的エネルギー <ul style="list-style-type: none"> 運動エネルギーと位置エネルギー 力学的エネルギーの保存 	<ul style="list-style-type: none"> 波 <ul style="list-style-type: none"> 波の性質 音と振動 熱 <ul style="list-style-type: none"> 熱と温度 熱の利用 電気 <ul style="list-style-type: none"> 物質と電気抵抗 電気の利用 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギーとその利用 <ul style="list-style-type: none"> エネルギーとその利用 物理学が拓く世界 <ul style="list-style-type: none"> 物理学が拓く世界 		

図 1.4：初等中等理科の「エネルギー」を柱とする内容構成（文部科学省，2019a）

(ア) 電流

㉞ 回路と電流・電圧

回路をつくり，回路の電流や電圧を測定する実験を行い，回路の各点を流れる電流や各部に加わる電圧についての規則性を見いだして理解すること。

㉟ 電流・電圧と抵抗

金属線に加わる電圧と電流を測定する実験を行い，電圧と電流の関係を見いだして理解するとともに，金属線には電気抵抗があることを理解すること。

(内容の取扱い)

ア アの(ア)の㉞の「回路」については，直列及び並列の回路を取り上げ，それぞれについて二つの抵抗のつなぎ方を中心に扱うこと。

イ アの(ア)の㉟の「電気抵抗」については，物質の種類によって抵抗の値が異なることを扱うこと。また，二つの抵抗をつなぐ場合の合成抵抗にも触れること。

図 1.5：中学校学習指導要領の理科における抵抗に関する記述の抜粋

図 1.5 は，中学校学習指導要領（文部科学省，2018a）において，抵抗に関する記述を抜粋したものである。ここでは，回路の各点を流れる電流と，各部に加わる電圧の関係性から抵抗の概念を導入し，直列及び並列回路や，2つの抵抗をつなぐ場合の合成抵抗を扱うことが明記されている。

高等学校学習指導要領解説理科編理数編（文部科学省，2019a）では，物理基礎の内容にある(2)様々な物理現象とエネルギーの利用の(ウ)電気において，「同じ物質からなる導体でも長さや断面積によって電気抵抗が異なることを見いだして理解させるとともに，物質の種類によって抵抗率が異なることを理解させること」とあり，中学校理科の学習を踏まえて，抵抗の形状依存性や抵抗率について扱うことが明記されている。また，高等学校物理の内容では，物質の抵抗率の温度変化や半導体の pn 接合，それらを含んだ回路及びキルヒホッフの法則について学習することとされている。

理科以外の教科では，中学校技術科において，エネルギー変換の技術について学習する中で，基本的な電気回路を扱い，電流の流れを制御する仕組みを知る（文部科学省，2018b）。また，高等学校工業科では，抵抗の性質として，抵抗率，導電率及び抵抗温度係数を取り上げ，それらを関連付けて電気抵抗の計算ができるよう扱う（文部科学省，2019b）こととされている。中学校技術科や高等学校工業科においては，抵抗の応用的・活用的な側面を軸とした内容構成とされており，この部分に対して理科との差異を確認することができる。

1.3 中等理科教育における電気抵抗に関する指導法の変遷

戦後中学校理科及び高等学校物理において，抵抗は一貫して扱われてきた。その中で，中学校理科における抵抗の形状依存性と合成抵抗の扱われ方には変遷が見られる。戦後から現在までの中学校学習指導要領の記述によると，1981年に施行された指導要領には「金属

の電気抵抗は、金属の種類、その長さや太さ及び接続の仕方によって変わること」とある。そこで、5社（大日本図書、東京書籍、学校図書、教育出版、啓林館）の1981年（昭和56年）初版発行の教科書を見ると、抵抗体の長さや太さ（断面積）と抵抗値の関係を表す記述がある。例えば、大日本図書1981年（昭和56年）初版発行の教科書（坪井ら、1980）では、パチンコ台モデル（愛知物理サークルら、1988）を用いた説明（図1.6）を確認することができる。パチンコ台モデルでは、電圧を台の高さとして例え、導線の長さを坂道の長さ、断面積を道幅として、同じ時間に転がってくる球（キャリア）の数を電流として説明している。高さが同じで坂道が長いと傾きが緩やかになり、球が転がり落ちる速さは遅くなる。これは、針金が長いほど電流は小さく、抵抗は大きいため、抵抗は長さに比例することを説明している。また、高さと同じ坂道である場合、道幅が広いほど同じ時間に転がってくる球の数は増えるため、電流は大きく、抵抗は小さくなる。これは、抵抗が幅（断面積）に反比例することを表している。

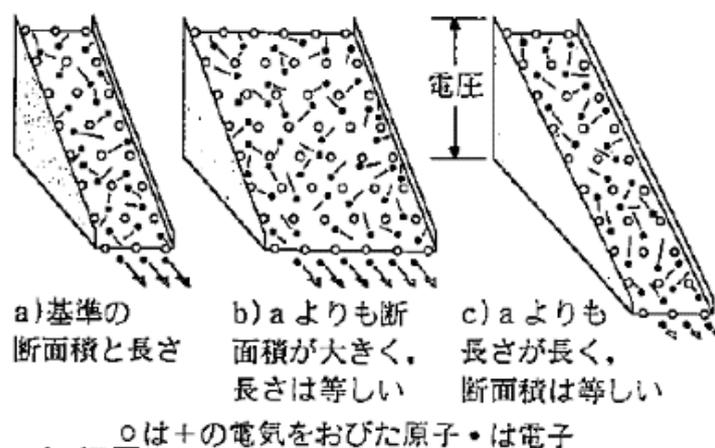


図 1.6：昭和 56 年初版発行の大日本図書出版の教科書におけるパチンコ台モデルを用いた説明図（坪井ら、1980）

東京書籍1983年（昭和58年）初版発行の教科書（藤井ら、1984）では、導体紙（導電紙）の幅を変化させて電流及び電圧を測定し、抵抗値を算出する実験が例示されていた。導体紙による実験は、パチンコ台モデルに対応させると、長さや幅の変化を視覚的に示すことが可能であるため、理解を促す目的があったことが推測される。また、大日本図書1987年（昭和62年）初版発行の教科書（戸田ら、1986）によると、電熱線を用いた実験方法の例示や、抵抗の形状依存性と合成抵抗を関連させた解説（図1.7）が見られた。これらの記述から、実験を通して抵抗の形状依存性を理解し、合成抵抗と関連させて抵抗の概念形成を図ることを目的とした授業の実施を推測することができる。

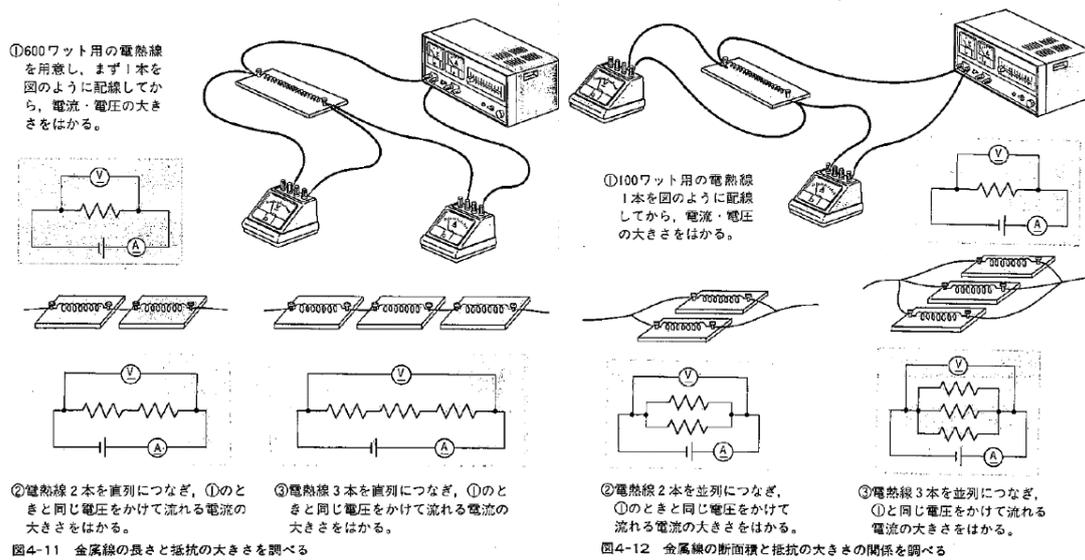


図 1.7：昭和 62 年初版発行の大日本図書出版の教科書における抵抗の形状依存性と合成抵抗の関連性を表す記述（戸田ら，1986）

1993 年（平成 5 年）に施行された指導要領には、抵抗の形状依存性に関する記述が削除されていた。また、「合成抵抗の式は扱わないこと」と明記された。この指導要領に沿って、教科書から抵抗の形状依存性や合成抵抗の公式が削除されたため、学校現場でも扱われなくなると考えられる。その後、2008 年（平成 20 年）に告示された指導要領には、「合成抵抗の式は扱わないこと」という記述が削除された。これを受けて、各出版社の教科書には、合成抵抗の公式が再び記載されるようになり、抵抗と長さ及び断面積との関係が発展的内容において説明される出版社も見られた。以降は大きな変化は見られず、現在も同様の扱いとなっている。

現在の中学校理科の教科書（例えば、有馬ら，2018）では、抵抗の形状依存性は合成抵抗の公式が成り立つ根拠として記載されているものの、発展的内容として扱われており、具体的な実験例は示されていない。したがって、現在の教科書では、抵抗の形状依存性は、合成抵抗を理解するための根拠として用いて説明される一方で、既存の抵抗器教材では実験の手順や結果の例を示すことができず、水流モデルという、電流の流れを水の流れに例えたアナロジー的な考え方を表す記述となっている。

1.4 電気抵抗に関する学力の現状と課題

理科教育学の研究では、抵抗を含む電気回路の学習に対する調査及び改善に向けた指導法の開発は、以前より盛んに行われてきた。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ことを示した。松原（1989）は学習者の並列回路に関する知識の構造化が不十分である

点を明らかにした。福山（2000）によると、多くの生徒は基本的な物理量（電流、電圧、抵抗）の概念を理解できていない可能性が高いと考えられる。沖花ら（2009）は並列回路の理解の不十分さを指摘している。岩本ら（2019）によると、電流と電圧の関係性を理解していない生徒が多く、福田ら（2021）は、授業中の実験では電圧が独立変数で電流は従属変数となり、抵抗は比例定数の逆数となることは、学習者を混乱させているとして、既存の指導過程に対する根本的な問題点を指摘した。

全国学力・学習状況調査では、2012年（平成24年）中学校理科の報告書において、電力量を求めることに課題（正答率11.5%）が見られたことから、2015年（平成27年）の調査では、これに関係する「オームの法則」の概念の形成の状況を把握するための問題が出題された。その正答率は59.9%であり、「オームの法則」を使って抵抗の値を求めることに課題があり、指導の充実が求められる（文部科学省・国立教育政策研究所、2015）とした。また、「オームの法則」の概念が形成できていないと考えられる解答類型は12.7%、「オームの法則」の概念が形成できていて式を正しく立てられるが、計算を誤っていると考えられる解答類型の反応率は5.2%であった。これらの対策として、電圧と電流のグラフから、抵抗の大きさの違いを確認する学習場面や、抵抗の大きさを計算して求めることに関連した学習内容、電気回路における電圧と電流を水圧と水流で表す水流モデルの例が提示された。しかしながら、2018年（平成30年）の調査でも、複数の実験の結果から必要な値を読み取り、オームの法則を使って、抵抗の値を求める問題に対する正答率は52.3%であり、指導の充実が求められる（文部科学省・国立教育政策研究所、2018a）状況であった。これらの対策として、電流と電圧との関係と電流の流れにくさを見出す学習場面が例示されたが、未だ改善の傾向は確認されていない。以上の結果から、単純な抵抗の理解にも課題があることが明らかとされており、複数の抵抗器によって構成される合成抵抗の理解が困難であることは容易に推測できる（石井ら、2021）という指摘もある。

OECD生徒の学習到達度調査（PISA2015）では、科学的リテラシーの科学的能力別平均得点の国際比較において、日本は各能力ともに上位に位置している。しかしながら、「科学の楽しさ」や「理科学習者としての自己効力感」などの指標値は、2006年調査との経年比較において肯定的な回答をする生徒の割合の増加は見られたものの、OECD平均を下回っている（国立教育政策研究所、2016）ことが明らかとされた。OECDは忍耐力や社交性、自尊心などの社会情動的スキルの育成の重要性を指摘しており、認知的スキルと社会情動的スキルは相互に作用し互いに影響を与え合う（OECDら、2018）としている。

認知的スキルに対して、非認知的な側面とも呼ばれる社会情動的スキルに関する課題も指摘されてきた。谷島ら（1996）は、生徒が理科に対して肯定的な態度をとる場合、生徒は具体的な教材に対して興味や関心を増しやすいうことを指摘した。川村（1996、1997）は高校生を対象とした中学校理科の内容に対する好感度の調査から、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明らかにした。原田ら（2018）は、中学校2年生の電気に関する内容の統制感（特定の手段を想定せずどの程度望む結果を得

られるかと期待しているかを指す期待概念)と興味価値(当該科目や単元に対するおもしろさや楽しさを指す価値概念)が低いことを報告した。

2018年(平成30年)の全国学力・学習状況調査では、学力調査と併せて、理科に関する質問紙調査も行われている。その結果、理科に関する興味・関心、授業の理解度等について肯定的に回答した生徒の割合は、平成24年度、平成27年度に比べて、若干の増加が見られるものの、ほぼ横ばいの傾向(文部科学省・国立教育政策研究所, 2018b)としている。また、「理科の勉強は大切だと思いますか」「理科の授業の内容はよく分かりますか」との質問に肯定的に回答した生徒の割合は7割を超える。しかしながら、「理科の授業で学習したことは、将来、社会に出たときに役に立つと思いますか」との質問に、肯定的に回答した生徒の割合は平成24年度以降、増加傾向が見られるものの、6割を下回っている。さらに、理科の学習に対する関心・意欲・態度の質問項目において、国語、数学と比較して理科は肯定的回答の割合が少ない傾向が示されている。

TIMSS(2019)では、小学校において、理科の「勉強は楽しい・得意だ」と答えた児童の割合は増加しており、引き続き、国際平均より上回っている。一方で、中学校において、「理科を勉強すると、日常生活に役立つ」「理科を使うことが含まれる職業につきたい」と答えた生徒の割合は、前回調査(2015)より増加しているが、国際平均より下回っている。いずれにおいても、肯定的な回答と平均得点の高さについては、正の関連が見られた(国立教育政策研究所, 2021)。この結果は感情面での課題は認知面の課題と関連している可能性を示している。

近年の理科教育研究でも、生徒の観察・実験に対するポジティブ感情が低い状態で深い価値の認知に介入することは、理科全般に対するポジティブ感情をより低減させてしまう可能性を示唆しており、教師は生徒の観察・実験に対するポジティブ感情の強度に応じて、興味の深さに介入する必要がある(齋藤ら, 2020)としている。

以上の先行研究や全国的な調査によると、中等理科教育における電気回路の学習に対する理解度や好感度が低いことが課題とされており、換言すると、認知的側面と社会情動的側面の双方を関連させたアプローチによる改善が必須である。したがって、中学校理科における抵抗に関わるカリキュラムにおいては、認知面と情意面の双方を関連させたアプローチによって、基本的な部分から単元全体を見通した抜本的な改革が必要であると考えられる。

1.5 既存の電気抵抗器教材とその課題

中学校や高等学校の教科書では、実験教材として用いる抵抗器として、電熱線やセメント抵抗器が例示されている場合が多い。

電熱線とは、ジュール熱を利用して発熱するデバイスであり、抵抗器の教材としても以前から用いられてきた。その抵抗体は、ニクロム(ニッケルとクロムの合金)を用いることが多い。セメント抵抗器とは、電熱線の周囲をセメントで覆った抵抗器のことであり、中学校理科のオームの法則の実験では、20W以上のセメント抵抗器が良い(内田洋行, 2022)と

されている。

高等学校では、物理基礎及び物理において、抵抗の形状依存性について学習する。物理基礎の教科書（例えば、國友ら，2018）には、「同じ材質であれば、抵抗は導体の長さに比例し、断面積に反比例する」と書かれている。ここでは、導体の長さや断面積を変える実験ではなく、この関係を用いて抵抗率を測定する実験が紹介されている。物理基礎では、抵抗の形状依存性を検証するためにニクロム線を用いた実験が、学習指導要領に例示（文部科学省，2019a）されているが、ニクロム線の使用は、発熱による危険性や、断面積の把握に留意する必要がある。

高等学校や理系大学初年次の学生実験等で電位の測定及び等電位線、電気力線の描画に用いられる導体紙（または導電紙）を活用した実験によって、抵抗の形状依存性を示すことが可能（深谷，1997；村上，2005）であり，1997年には高等学校の教科書にも記載されていた（穂積，1997）。しかし，導体紙は高抵抗体（上西，1993）であるため，回路内に組み込んで豆電球やLEDを点灯させることは困難であり，抵抗値の測定には大きな印加電圧が必要となる。

一方で，低抵抗体であるアルミニウム箔を用いた実験では，導電性の高さや加工の困難さにより，汎用的な装置では抵抗値の測定は困難である（川北ら，1992）。また，放電記録紙を用いた，中学校理科における授業実践（池田，2018）の報告もあるが，電極との接触抵抗と試料の抵抗値の差がほとんど同等なオーダーであるため，抵抗値の長さ依存性の実験結果を示すグラフにおいて原点を通る直線は描けない。

福山（2000）は、「電流」，「電圧」，「抵抗」の概念に対して適切なイメージを伴って理解できるように学習と，それを確証させる新しい実験の必要性を指摘している。前節で述べた，中等理科教育における電気回路の学習の抵抗器教材及び指導法に関する調査や研究を受けて，近年では，新しい教材や指導法の開発が盛んに行われている。

石川ら（2017）は，鉛筆を用いた手描き抵抗（図 1.8）を用いた実践から，中学校理科において抵抗体の長さや太さと抵抗値との関係を定性的に扱うことが可能であることを確認し，合成抵抗の大きさの把握に対する有効性を示した。しかしながら，実際の授業では定量性を担保することは困難であり，授業で扱う内容や事後アンケートの項目は定性的なものであった。また，抵抗の形状変化と関連付けた合成抵抗の理解を促すことが今後の課題であるとした。

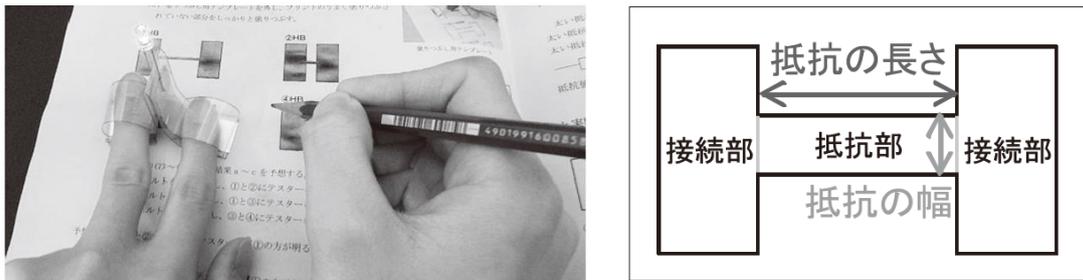


図 1.8：鉛筆を用いた手描き抵抗（石川ら，2017）

一条ら (2016) 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) (図 1.9) を、高等専門学校 1 年生の電気回路基礎工学に活用し、その教育効果は大きいとした。また、酒井ら (2018) は、回路マーカーにプラチナ万年筆製筆ペンを加えることで合成抵抗の教材化に成功した。ただし、回路マーカーを使用する際は、専用紙を用いなければ導電効果が失われる可能性がある点に注意が必要である。

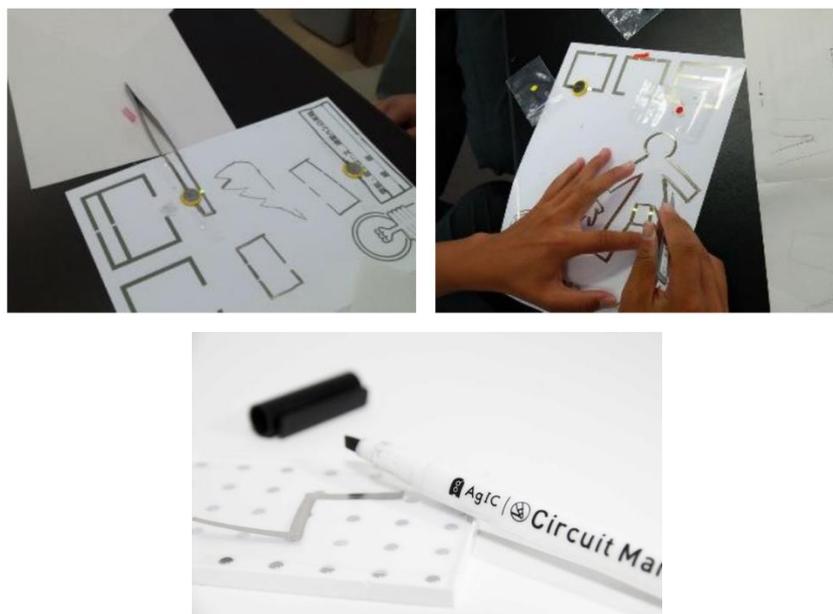


図 1.9：エレファンテック (旧 AgIC) 社の回路マーカー (Circuit Marker)
(一条ら, 2016 ; AgIC 社ウェブページ)

著者らは、イギリスの Bare Conductive 社が開発した、専用紙を必要としない、水性溶液にカーボンを含む導電ペン「Electric Paint」を用いて、その授業等での活用方法について検討した。図 1.10 左は線の太さの違いによる LED の明るさの変化を表す。図 1.10 には示していないが、長さの違いによる影響も同様に示すことができる。

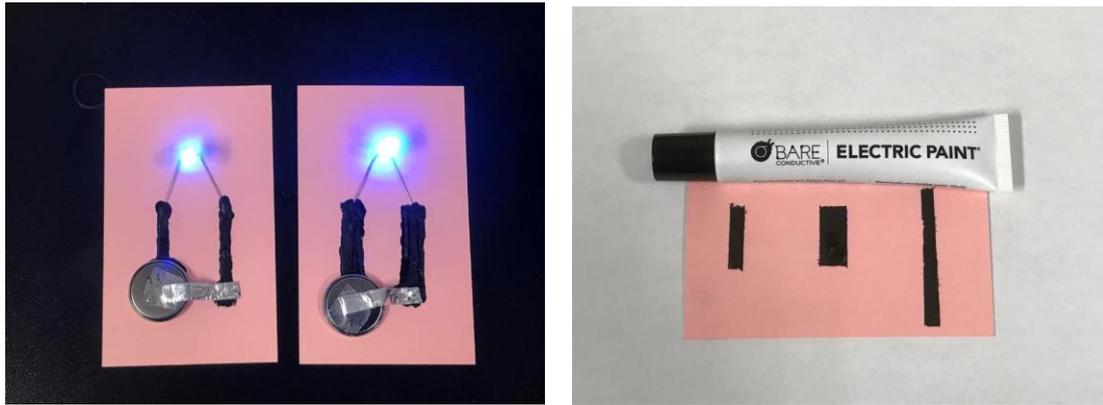


図 1.10： Bare conductive 社の導電ペン（Electric paint）による描画の例示と LED の発光

鉛筆を用いた手描き抵抗や回路マーカーは、抵抗体の長さや断面積という 3 次元的な変数を、紙面上の抵抗体における長さや幅（太さ）として、擬似的に 2 次元として扱うことで、断面積の把握を容易にした。これらの教材を活用すれば、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と考えられる。しかしながら、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。また、導電ペンは「乾かす」ことが必須で、経時変化も著しい。

以上のように、近年は、抵抗の学習における問題点を克服するための、新しい抵抗器教材や指導法の開発が盛んに行われているものの、未だ実効性のある最適な教材や、実験指導方法の確立には至っていない。

表 1.1 は、様々な抵抗器教材の種類ごとの性能を比較したものである。同じ種類の抵抗器であっても、当然抵抗値は様々であるため、表中の抵抗値は机上スケールにおける実験を想定したオーダーを記載した。先行研究における抵抗器教材の課題や改善策について、安全性、理解度、再現性、活用性の 4 つの視点にまとめることができる。

(1) 安全性

電熱線やセメント抵抗器の抵抗値が低いことによって発熱量が大きく、通電時間の制限や火傷などの危険性がある。抵抗率の高い抵抗体を用いることで、授業時間内における生徒主体の実験活動において安全性を担保できると考えられる。

(2) 理解度

抵抗の形状依存性（抵抗値が抵抗体の長さに比例し、断面積に反比例すること）を実験結果から理解するためには、断面積の把握が必要不可欠である。実験教材としてニクロム線を用いた場合、断面積の変化量は小さく、また直径の測定と断面積の算出が必須となるため、断面積の把握にはこれらの手順を踏む必要がある。一方で、断面積の測定及び算出の手順を

省くために、ニクロム線の数を増やして並列接続することによって断面積を1本分の倍数として変化させる方法を取る場合もあるが、正確には並列接続における合成抵抗を測定していることとなり、抵抗体の断面積を直接的に変化させて抵抗値を測定する手法ではない。他方で、擬似的な2次元性をもつ抵抗体を活用することで、断面積を太さや幅としてパラメータを変換することができ、断面積の直感的な理解や変化の把握が可能となる。

表 1.1 電気抵抗器教材の比較

抵抗器教材 (抵抗体)	抵抗値のオーダー	安全性 (発熱)	抵抗体の形状 把握 (理解度)	再現性 (加工性)
電熱線 (ニクロム)	$10^1 \Omega$ (L=10cm, $\phi=0.2\text{mm}$)	Δ	長さ: \circ 断面積: Δ	再現性: \circ 加工性: Δ
セメント抵抗器	$10^1 \Omega$	\circ	\times	再現性: \circ 加工性: \times
導電紙 (導体紙)	$10^6 \Omega$ (L=10cm, W=1cm)	\odot	\circ	\circ
アルミニウム箔	$10^{-1} \Omega$ (L=10cm, W=1cm)	Δ	\circ	Δ
放電記録用紙	$10^0 (1) \Omega$	\circ	\circ	\circ
手描き抵抗 (鉛筆)	$10^5 \Omega$ ※1 (L=10cm, W=1mm)	\odot	長さ: \circ 太さ: Δ 濃さ: Δ	Δ
回路マーカー	$10^1 \Omega$ (L=10cm, W=2mm)	\circ	長さ: \circ 太さ: Δ 濃さ: Δ	Δ
導電ペン	$10^3 \Omega$ ※2 (L=10cm, W=2mm)	\odot	長さ: \circ 太さ: Δ 濃さ: Δ	Δ
Carbon nanotube paper (CNP)	$10^3 \Omega$ (L=10cm, W=2mm)	\odot	\circ	\circ

※1 石川 (2017) の L=1cm の値を 10 倍した。

※2 Bare Conductive 社ウェブサイト記載のシート抵抗 $55 \Omega/\text{sq}$. (厚さ $50 \mu\text{m}$) から算出した。

(3) 再現性

鉛筆やペンを用いた抵抗器教材は、抵抗体の形状変化の把握や安全性に優れている一方で、再現性を担保して繰り返し実験を行うことに対して課題があり、描画する抵抗体の濃さや太さを一定に保つことは容易ではない。再現性に対しては、従来から学校現場において活

用されてきた電熱線やセメント抵抗器は優れた教材である。また、導電紙などの、紙でできた抵抗器は、加工の簡便さや加工精度の高さによって、生徒主体の実験活動においても再現性を担保して繰り返し測定を行うことが期待できる。

(4) 活用性

抵抗器教材としては、抵抗の理解を促すことが重要であるが、学ぶ有用性を実感させるためには、抵抗の日常生活における活用例を実演できることが望ましいと考えられる。既存の導電紙（導体紙）は、安全性や理解度、再現性に優れた教材である一方で、LED等の点灯に用いる抵抗器としては抵抗値が高いため、適切ではない。逆に、ニクロム等の低抵抗体では、前述のような発熱による安全性の懸念がある。安全性と活用性を兼ね備えた抵抗値（数100～数k Ω 程度）の抵抗器が実験教材としては最適である。表1.1中に「CNP」と表記したものは、近年新素材として開発された、カーボンナノチューブを含ませた紙であるカーボン・ナノチューブ・ペーパー（以下CNP）を用いたCNP抵抗器（Shintsuruta et al., 2021）である。表1.1の記述から、安全性、理解度、再現性のいずれも優れていると同時に、導電紙における課題であった活用性に対しても克服できる可能性が高いと考えられる。

2017年（平成29年）、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（文部科学省，2018a）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」（文部科学省，2019a）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、探究活動の充実がこれまで以上に重視されると考えられる。したがって、抵抗の学習内容においても、中学校理科、高等学校物理基礎及び物理、理数探究を含めたシークエンスの中で「探究」の重要性が高まっていると考えられる。

以上の先行研究や現状における問題点を克服するためには、中等理科教育における電気回路の学習全体を見通して、探究活動における活用を視野に入れた、適度な抵抗値と生徒による扱いの容易さを併せ持つ、新しい抵抗器教材の開発が必要であり、CNPはその有力な候補となる可能性がある。

1.5 研究の目的と構成

本研究はCNP抵抗器を中等理科教育における電気回路の学習に導入することで、どのような新しい学びが可能となるのか明らかにすることを試みる。本研究の目的は次の通りである。

【研究の目的】

中等理科教育における電気回路の学習に、CNP 抵抗器を開発・導入することによって可能となる新しい学びとはどのようなものか明らかにする。

【研究の構成】

本研究の構成は、次に示す5段階である。

- (1) 教材の開発
- (2) 指導法の開発
- (3) 授業の実践
- (4) 実践結果の分析
- (5) 今後への示唆

(1)教材の開発では、CNP の利点を生かして、中等理科教育における電気回路の学習での活用を想定した CNP 抵抗器教材を開発する。(2)指導法の開発では、視覚的理解を促す CNP 抵抗器の実験を取り入れた、抵抗の形状依存性を実験的・経験的に学習可能な方法及び合成抵抗の指導方法の提案を行う。(3)授業の実践では、新しい授業構想に基づく実践を行い、多面的な手法を用いて授業実践の様子や結果を記録する。(4)実践結果の分析では、実践結果が示すデータを量的及び質的に分析することで学習者に与える影響を明らかにする。(5)今後への示唆では、分析結果に基づく考察により、今後の中等理科教育における電気回路の学習に対する示唆を得ることを目指す。なお、今後への示唆においては、抵抗の概念が導入される中学校理科「電流とその利用」単元における抵抗の形状依存性をテーマとした実験を組み込んだ合成抵抗の新規学習指導法の開発を主軸としながら、高等学校物理及び理数探究を視野に入れて、中等理科教育における電気回路の学習全体を見通し、その中の位置づけについて検討する。

1.6 本研究テーマにおける教科開発学としての位置付け

本研究は中等理科教育における電気回路の学習内容に着目したものであり、自然系教科学(理科)を基軸とした教科開発学(図 1.11)における研究テーマとして位置付けられる。

教科開発学は、教科専門・教科教育・教職専門の枠を越えて、子どもたちを取り巻く環境を視野に入れ、教科との関わりの中で学校教育が抱える複雑・多様化した諸課題に対応した研究を遂行するものである(白畑, 2015)。教科学は、教科専門と教科教育を融合・発展させたものであり、教育環境学は、教職専門を発展させたものである。教科開発学は、主に、教育環境に適した教育内容構成の研究(教科学)と教科内容として構成されたものを実践するための教育環境の研究(教育環境学)から構成される。

本研究は自然系教科学における理科を基軸としている。教科学研究には、教育論、教育内容論、教材論という3つの方向からのアプローチが想定されている。

電気は現代の社会や日常生活に欠かせないものであり、次代を担う人材を育成するとい

う観点や、児童・生徒が科学的リテラシーを身に付けるという観点から、理科教育における重要な学習内容の一つとされている。平成29年告示の学習指導要領改訂における基本的な考え方では、理科を学ぶ意義や有用性の実感及び理科への関心を高める観点から、日常生活や社会との関連を重視（文部科学省，2018a）しており、電気分野の教育に対する注目が集まっている。したがって、理科教育の枠組みの中で、電気について、何をどのように扱うかという内容論や方法論に対する関心が高まっていると考えられる。

本研究は、小学校から高等学校の理科教育において連続的に扱われている電気に関する学習内容を見直し、検討することから始まる。中学校理科で初めて導入される電気抵抗という概念は、小学校理科において系統的に学習する電流という概念と強く関係している。また、その後に学習する電力や電力量という考え方や、高等学校の内容の基礎となる重要な部分に位置付けられるのが抵抗である。当然、大学以降で学ぶことになる電磁気学の体系を模範としている。教科専門の視点から、物理学を中心として、電気抵抗に関する学習内容の分析や、教材化にふさわしい素材の吟味を専門的な視点で行う。先端科学技術を積極的に取り入れ、教材の中に有機的に組み込むことを試みる。この理科カリキュラムにおけるシークエンスの中で、教育内容論的なアプローチにより、新しい教育内容の導入について検討する。

本研究の中心核となるのが、新素材を用いた教材開発である。上記の通り、教育論や教育内容論に関する議論を深め、学習者に効果的な学習環境を整えるための教材開発である。本研究の遂行に際しては、教科教育学における理科教育学の視点が必要不可欠である。授業方法や教材の研究、授業実践とその評価には、これまでの理科教育学における理科学習の研究成果や研究手法を活用する。教科教育学の研究は、教職実践や学習科学、認知科学等の研究結果と強く関連しながら発展してきた。本研究においても、これらの知見を取り入れて、教育実践の中に組み込むことを目指した。

なお、本研究は理科における自然系教科学研究を基軸としているが、その遂行においては教育環境学の視点が必須である。教育環境学は教職専門を発展させたものとされており、教育環境に適した教育内容構成の研究が教科学研究とされ、その教科内容として構成されたものを実践するために必要な知見が教育環境学であると考えられる。すなわち、本研究の実践部分であり、開発した新しい教育活動の実践及び効果検証において、授業者及び学習者理解、授業者と学習者との関わりにより生まれる学習環境の理解に対して、教育環境学の研究と関連している。

本研究は、自然系教科学（理科）を基軸として、中等理科教育における教育内容論・教材論の追究及び、開発した教材及び指導法を教育環境の視点を踏まえた実践とその結果の分析によって遂行される。現在の教育環境に適合した教科内容の構成、現代の学校における理科教育の課題に対応した教科内容構成を実践するための教育環境整備、教材と授業構成を軸として研究を進める。このことが、教科開発学の設立及び発展への寄与となることを確信している。本研究は、現代の理科教育における現状の分析、課題の設定、教材の開発、授業の計画、実践に基づいた量的及び質的分析による考察と、すべての過程において教科開発学

研究の一部を担うものである。

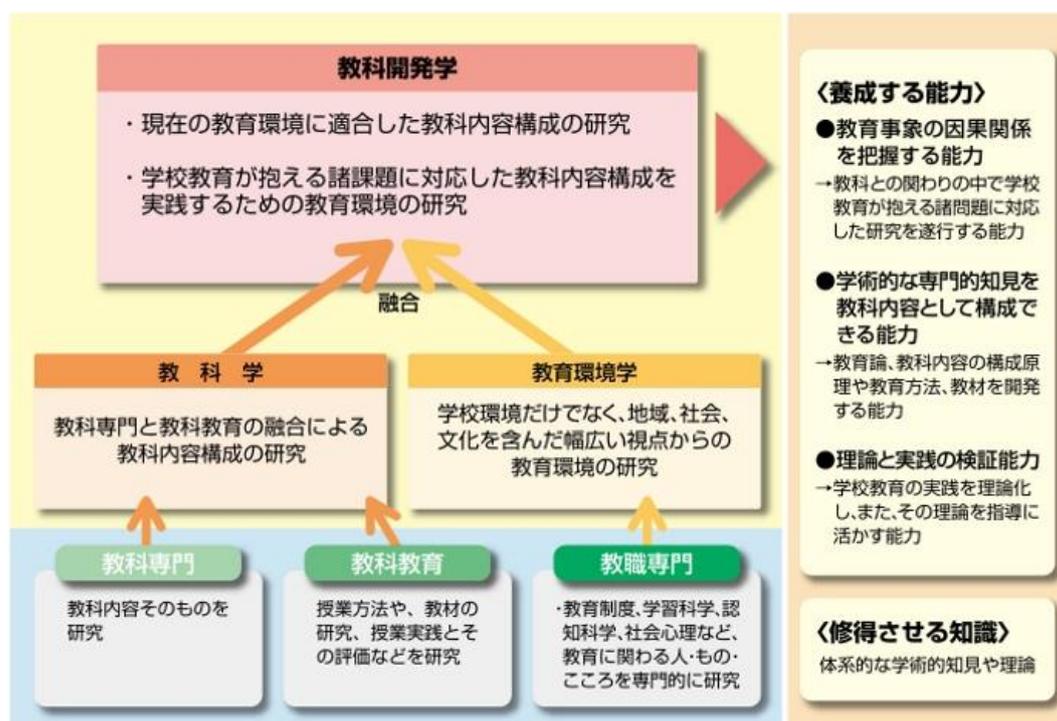


図 1.11：教科開発学における研究目標と養成する能力

(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ウェブページ)

1.7 本論文の構成

本論文の構成を以下に記す。第1章「序章」では、電気抵抗の概念形成と既存の教材における問題点について述べた。第2章「新規教材の開発」では、第1章で述べた課題及び研究目的に基づいて開発した、CNP抵抗器等の教材について、それらの構造や性能について解説する。第3章では、開発した教材を用いて可能となる新しい指導法の提示と、それらの詳細について述べる。その際、中等理科教育の中でも、中学校理科「電流とその利用」単元を中心として、高等学校物理基礎及び物理、高等学校理数科における新しい科目である「理数探究」における活用を見据えた議論を行う。第4章では、指導法の実践結果に基づいた考察を行うことにより、中等理科教育における電気回路の学習にCNP抵抗器を導入することによって可能となる新しい学びとはどのようなものか明らかにすることを試みる。第5章は研究成果を結論として述べ、今後の中等理科教育における示唆を得ることで、総括とする。

第2章

新規教材の開発

第2章

新規教材の開発

2.1 CNP抵抗器

本研究では、カーボンナノチューブを含むことで市販の導電紙よりも抵抗値を下げることを可能とした、適度な導電性を示すカーボン・ナノチューブ・ペーパー（CNP）を抵抗器教材における抵抗体として活用する（図 2.1）。CNP は特種東海製紙株式会社によって製造されており、現在は A4 サイズ 1 枚（厚さ 0.2 mm）500 円程度の価格で、株式会社ナリカや株式会社内田洋行から購入可能である。CNP は抵抗の形状依存性を定量的に示すことが可能であるため、教育現場での活用が期待されている（新鶴田ら，2021）。

CNP は黒色の画用紙と似通った外見や触感である。一般的な画用紙と同様に扱うことができるため、はさみ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。

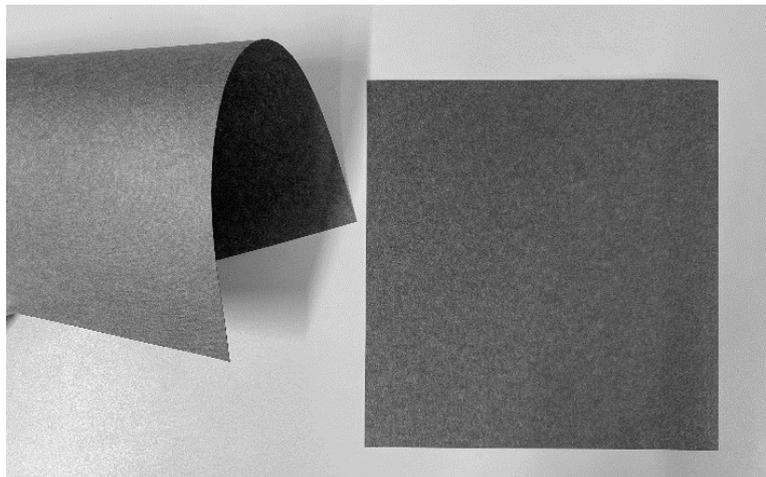


図 2.1 : CNP（カーボン・ナノチューブ・ペーパー）

プラスチック製の定規を土台として、その上に CNP 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 2.2）。定規の目盛りに合わせてピンチコックを動かすことで、抵抗値を測定する部分の長さを容易に変化させることが可能である。また、任意の幅（例えば、1.0 cm, 2.0 cm）に加工した CNP を使用すれば、幅の違いによる抵抗値の変化を調べる実験が可能である。当然、鉛筆やマーカーの線と比較して、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。

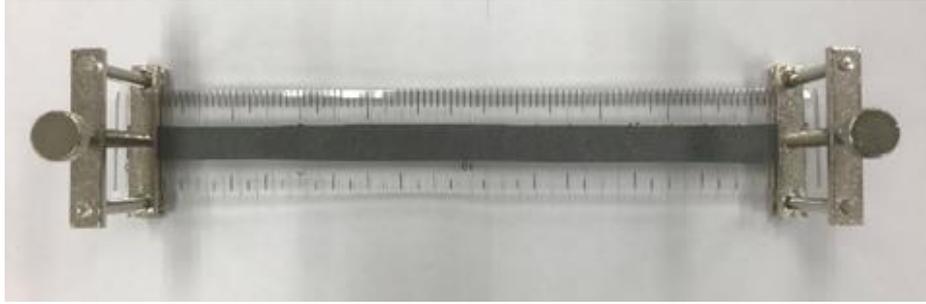


図 2.2：開発した CNP 抵抗器教材の基本的な形状

電極として使用するピンチコックを CNP の幅より大きなものにするこゝで、抵抗体の中に一様に電場が生じて、電流を流すことができる。また、ピンチコックを用いるこゝで電極と抵抗体を強く密着させることができ、接触抵抗による測定値への影響を極力減らすことができる。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、コストを抑えた簡易的な実験が可能となり、オンライン授業や自宅で行う実験教材としても簡単に活用可能である。

2.2 矩形の CNP の電気抵抗値

図 2.3 は CNP の抵抗値をデジタルマルチメータ (RS PRO, 123-1938; $\pm 1.2\%$ of rdg ± 2 dgts) を用いて測定する様子である。

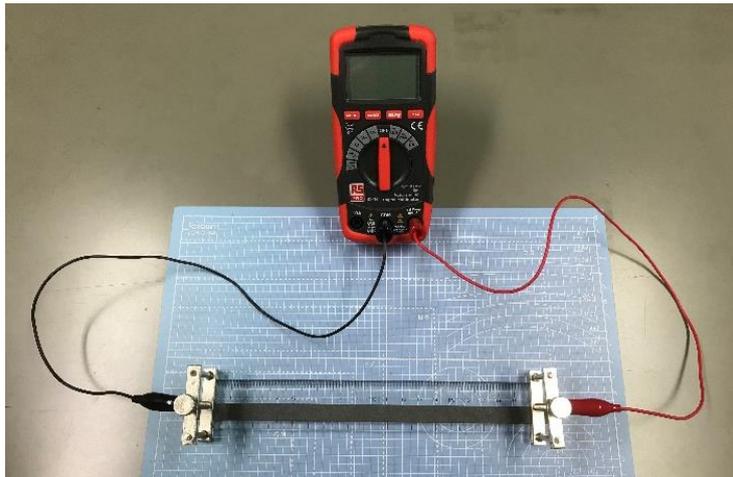


図 2.3 CNP の抵抗値を測定する様子

購入した CNP を幅 2.0 cm、長さ 20.0 cm に加工し、電極間の距離を 10.0 cm として抵抗値を測定した。CNP 抵抗器は、抵抗体である CNP をプラスチック製の定規とピンチコックによって手で挟み込んで固定し、その都度抵抗値を測定するため、ある程度の測定値のば

らつきが想定される。表 2.1 は、同じ CNP を用いて同様に複数回測定した結果を示す。ただし、1 回ごとに両端のピンチコックを外して、再度取り付けてから測定している。ピンチコックの位置によるわずかな長さの変化や、ピンチコックが CNP を圧縮する力の変化等により、1%程度の抵抗値の差が表れることを確認した。

表 2.1 同じ CNP を 1 回ごとに取り外して抵抗値を測定した結果

測定別	抵抗値 [Ω]	平均値との差 [Ω]
1 回目	796	6.2
2 回目	791	11.2
3 回目	810	7.8
4 回目	812	9.8
5 回目	802	0.2
平均値	802.2	0.0

次に、等しい形状に加工された複数の CNP を用いて同様に抵抗値を測定することで、ペーパーごとの個体差がどの程度存在するのか調べた。表 2.1 で使用した CNP を 1 枚目として、同じ形状に加工した CNP をランダムに合計 5 枚用意し、抵抗値を測定した。表 2.2 には、それぞれの抵抗値と、式(1.4)を変形した、

$$\rho_s = \frac{RW}{L} \quad (2.1)$$

に基づいて、それぞれの抵抗値に幅 2.0 cm を乗じて、長さ 10.0 cm で除したシート抵抗値を記載した。

表 2.2 同じ形状に加工された CNP の抵抗値とシート抵抗値

測定別	抵抗値 [Ω]	シート抵抗値 [$\Omega/\text{sq.}$]	平均値との差 [$\Omega/\text{sq.}$]
1 枚目	796	159.2	2.84
2 枚目	819	163.8	1.76
3 枚目	825	165.0	2.96
4 枚目	805	161.0	1.04
5 枚目	806	161.2	0.84
平均値	810.2	162.04	0.00

表 2.2 から、測定に用いるペーパーによって、抵抗値及びシート抵抗値は変化することを確認した。この差の要因は、CNP 製造時に既に発生している部分を含む可能性がある。

したがって、実際の授業においては、表 2.1 や表 2.2 に示すような抵抗値及びシート抵抗値の差異に留意して活用する必要がある。当然、授業の目標によっては、これらの差異を強

調する必要のない場合も考えられる。一方で、シート抵抗値を用いて様々な形状の抵抗値を理論的に予測する際には、まず、矩形の抵抗値を測定して算出したシート抵抗値を用いることが必要である。

図 2.4 は、CNP の幅を、0.5 cm, 0.75 cm, 1.0 cm, 2.0 cm と変化させた場合の、それぞれの抵抗の長さ依存性を測定した結果である。電極の位置を移動させることで、CNP の長さを 3.0 cm ずつ変化させて抵抗値を測定した。グラフは、比例関係をよく表している。

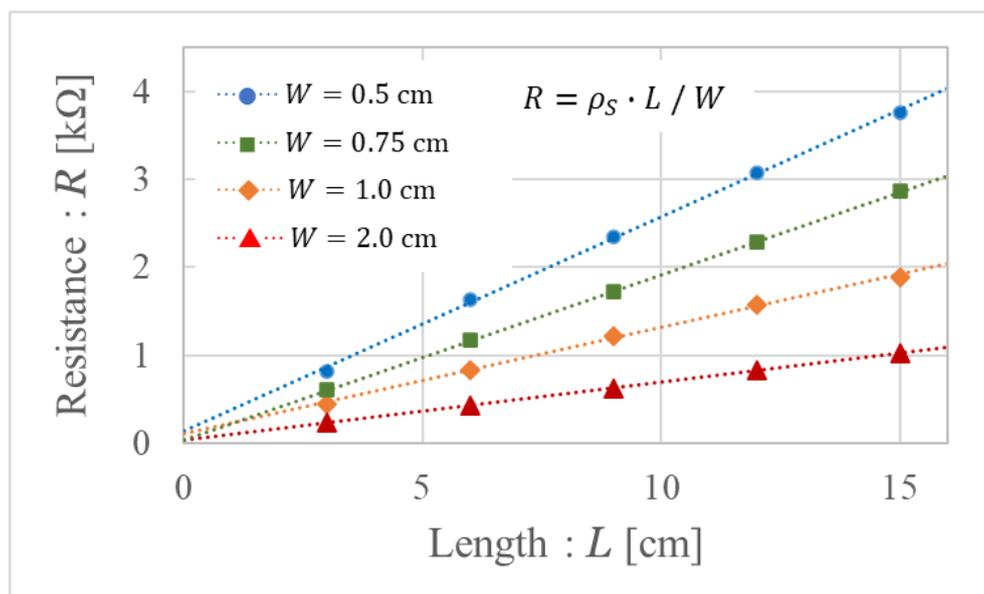


図 2.4 : CNP の抵抗値の長さ依存性

表 2.3 は、図 2.4 におけるそれぞれ幅に対する直線の傾き ρ_s/W と、それぞれの傾きから計算したシート抵抗の値である。幅の異なる CNP のシート抵抗値の差異は、表 2.1 に示されている装置による影響と、表 2.2 に示されている個体差による影響を含んでいると考えられる。なお、シート抵抗の平均値は約 $130 \Omega/\text{sq.}$ であった。

表 2.3 : グラフの傾きから計算したシート抵抗値

幅 : W [cm]	傾き : $\rho_s/W [\Omega/\text{cm}]$	シート抵抗 : $\rho_s [\Omega/\text{sq.}]$
0.5	243.1	121.55
0.75	187.5	140.63
1.0	120.8	120.80
2.0	65.8	131.60

図 2.3 と同様の手順により、長さ 10.0 cm と 20.0 cm の CNP を用いて、幅を 0.5 cm ずつ変化させて測定した抵抗値を図 2.5 に示す。グラフは、抵抗値の幅による依存性を表しており、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、

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.2)$$

と表し、「電流の流れやすさ」として定義した上で導入する。

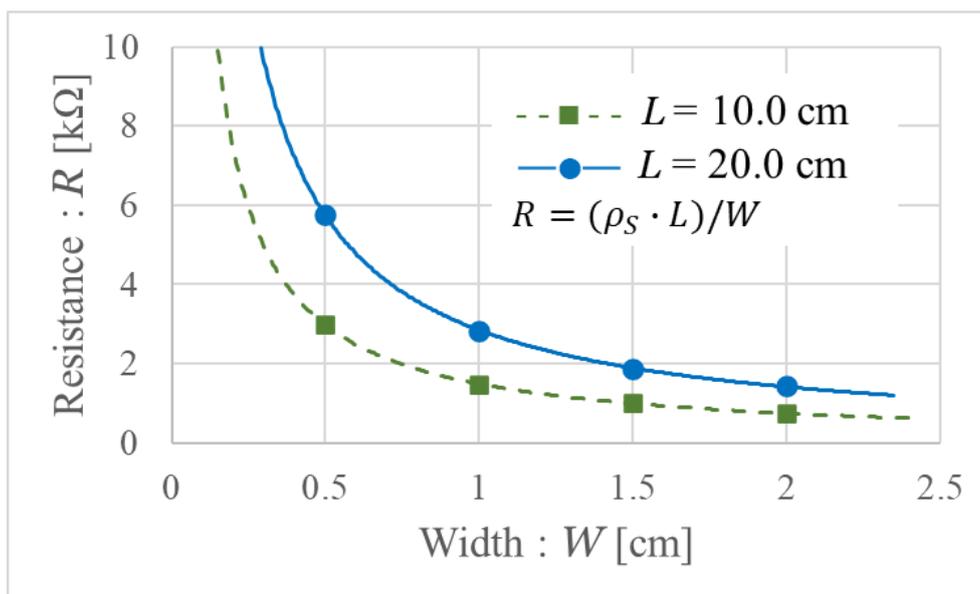


図 2.5 : CNP の抵抗値の幅依存性

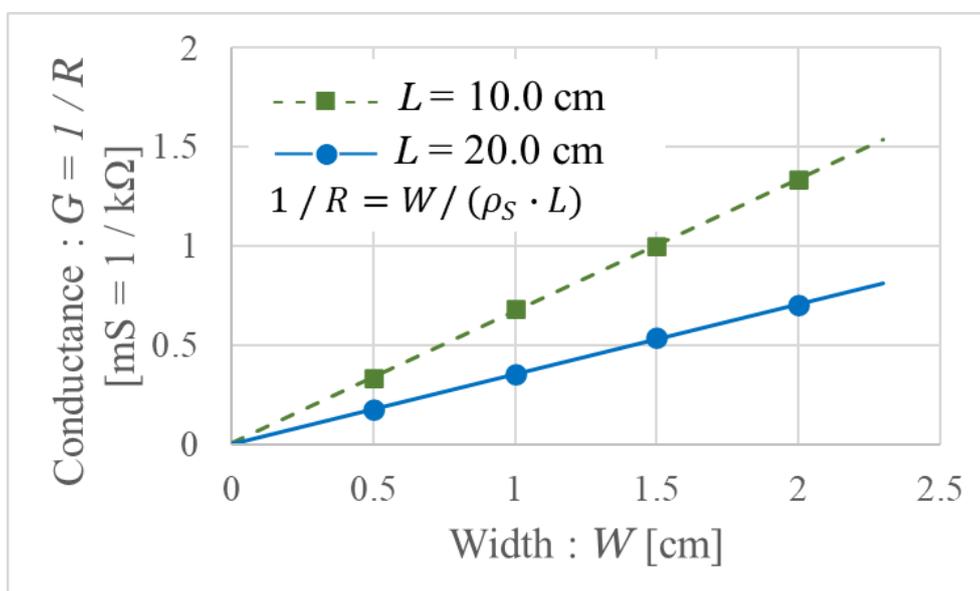


図 2.6 : 抵抗の逆数 (コンダクタンス) の幅依存性

図 2.6 は、図 2.5 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を、実験結果から確認することができる。

図 2.4 や図 2.5 のように、CNP の抵抗値は数 $k\Omega$ 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 10Ω のオーダー）と比較して大きく、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 1Ω 以下）による影響を考慮する必要はない。

ニクロム線などの従前の教材では、抵抗率が低いため、発熱に対する危険性を無視することはできない。また、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り、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。以上の点を考慮すると、CNP の教材としての安全性や、幅を変化させることで断面積の変化量を視覚的に捉え、容易に理解できることは、大きな利点である。

2.3 台形の CNP の電気抵抗値

CNP は加工が容易であるため、矩形のみでなく特殊な形状の抵抗体の抵抗値を測定することも可能である。例えば、図 2.7 のような、長さ（高さ） L 、上底 a 、下底 b （便宜上 $a < b$ とする）の台形に沿ってカットされた CNP を用意し、上底及び下底に電極を配置する。CNP 内の等電位線が上底及び下底に対して平行であると仮定すると、抵抗値は高等学校の数学の範囲内で簡単に計算することができる。したがって、高等学校における探究的な学習のテーマとしての想定が可能である。

図 2.7 によると、長さ Δx 、幅 W の微小な長方形部分の電気抵抗 ΔR は、

$$\Delta R = \rho_s \frac{\Delta x}{W} \quad (2.3)$$

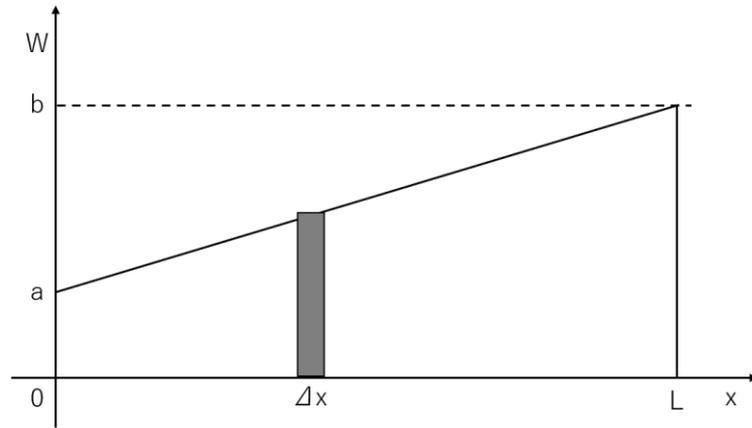
となる。したがって、全体の電気抵抗 R は、

$$R = \rho_s \int_0^L \frac{1}{W} dx \quad (2.4)$$

$$= \rho_s \int_0^L \frac{1}{a + \frac{b-a}{L}x} dx \quad (2.5)$$

$$= \rho_s \frac{L}{b-a} \ln \frac{b}{a} \quad (2.6)$$

のように求めることができる。



$$y = a + \frac{b-a}{L}x \quad (2.7)$$

図 2.7：台形状にカットされた CNP

ここで、式(2.6)に対して、 $a \rightarrow b$ のときの極限をとると、 $t = b - a$ として

$$\lim_{a \rightarrow b} R = \lim_{t \rightarrow 0} \rho_S \frac{L}{t} \ln \frac{b}{b-t} \quad (2.8)$$

$$= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_S \frac{L}{t} \ln \frac{1}{1-\frac{t}{b}} \quad (2.9)$$

$$= \lim_{t \rightarrow 0} \rho_S \frac{L}{t} \left[-\ln \left(1 - \frac{t}{b} \right) \right] \quad (2.10)$$

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

$$\ln \left(1 - \frac{t}{b} \right) = -\frac{t}{b} - \frac{1}{2} \frac{t^2}{b^2} - \dots \quad (2.11)$$

であるから、

$$\lim_{a \rightarrow b} R = \lim_{t \rightarrow 0} \rho_s \frac{L}{t} \left(\frac{t}{b} \right) \quad (2.12)$$

$$= \rho_s \frac{L}{b} \quad (2.13)$$

となり、長方形の式(1.4)と一致する。

図 2.8 は、 L を 10.0 cm に固定し、 a 及び b の値を適宜変化させて抵抗値を測定した結果と共に、理論式を描画したものである。なお、図 2.9 は図 2.8 の横軸を $\ln(b/a)$ としてプロットしたグラフである。理論式の導出では、シート抵抗値 $\rho_s = 125 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ を用いた。測定値は計算結果とよく一致し、対数関係を確認することもできる。

以上に示すように、単純な積分計算によって対数関数を含む解が得られることから、高等学校における探究的な学習のテーマとして適当であると考えられる。また、CNP の加工や抵抗値の測定などの実験のプロセスも、生徒主体の活動が可能である。したがって、理論値の導出及び測定値との比較を通して考察を深め、探究を進める学習活動が実施できると考えられる。これらの点を踏まえると、特に、平成 30 年度告示の学習指導要領における新設科目である「理数探究」の教材及び学習テーマとして最適であると考えられる。

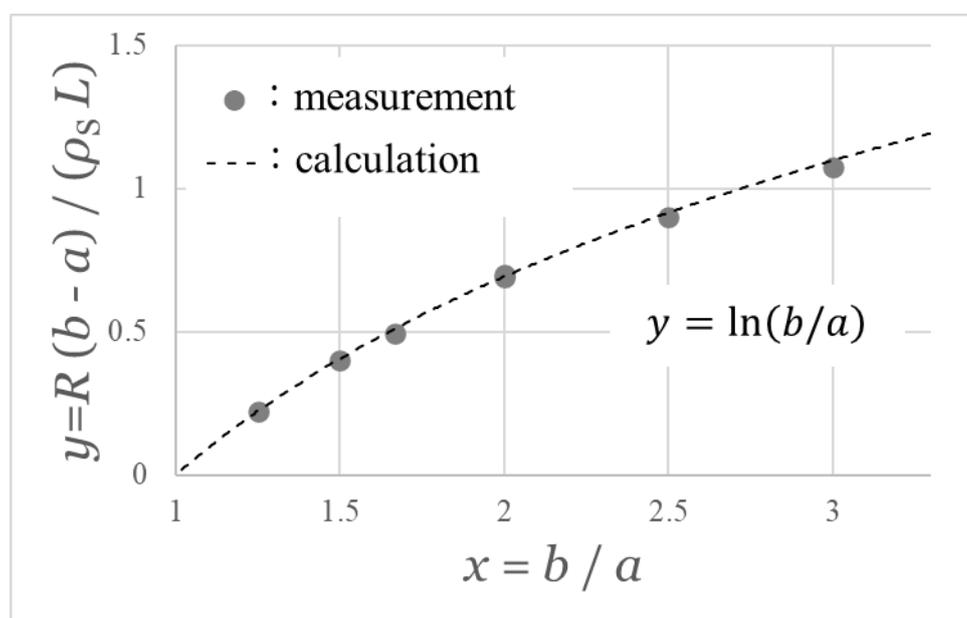


図 2.8：台形状の CNP の測定値と理論値の比較

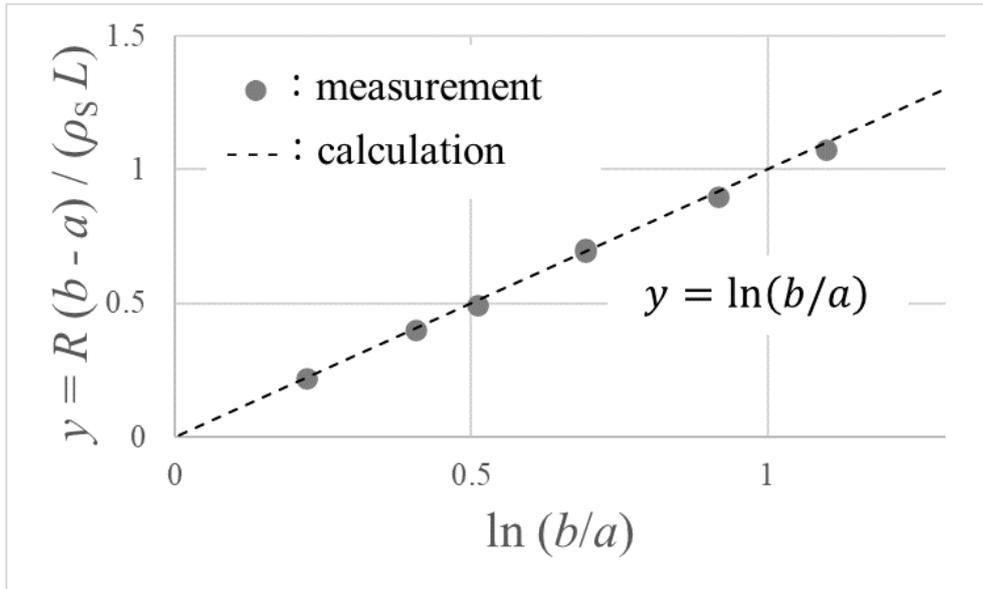


図 2.9：台形状の CNP の測定値と理論値の比較（横軸は対数）

2.4 半輪形の CNP の電気抵抗値

図 2.10 のような半輪形の CNP の両端を電極につないだ抵抗を考える。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。

CNP のコンダクタンス G は式(1.4)、式(2.1)より、

$$G = \frac{1}{R} = \frac{W}{\rho_s L} \quad (2.14)$$

である。微小半径 Δr における微小コンダクタンスは、

$$\Delta G = \frac{\Delta r}{\rho_s \pi r} \quad (2.15)$$

であるから、全体のコンダクタンスは、

$$G = \frac{1}{\pi \rho_s} \int_a^b \frac{dr}{r} = \frac{1}{\pi \rho_s} \ln \frac{b}{a} \quad (2.16)$$

である。したがって、半輪形の抵抗は、

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\pi \rho_s}{\ln \frac{b}{a}} \quad (2.17)$$

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。

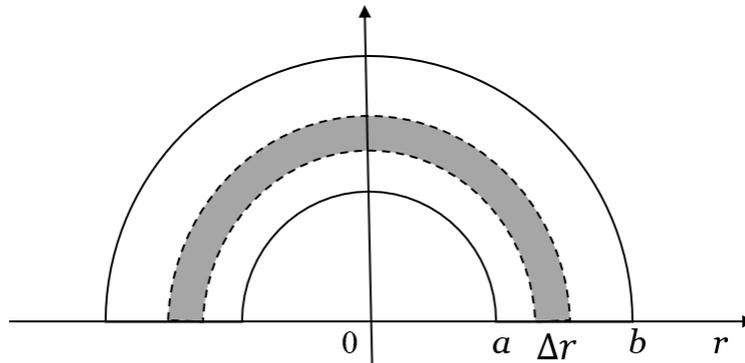
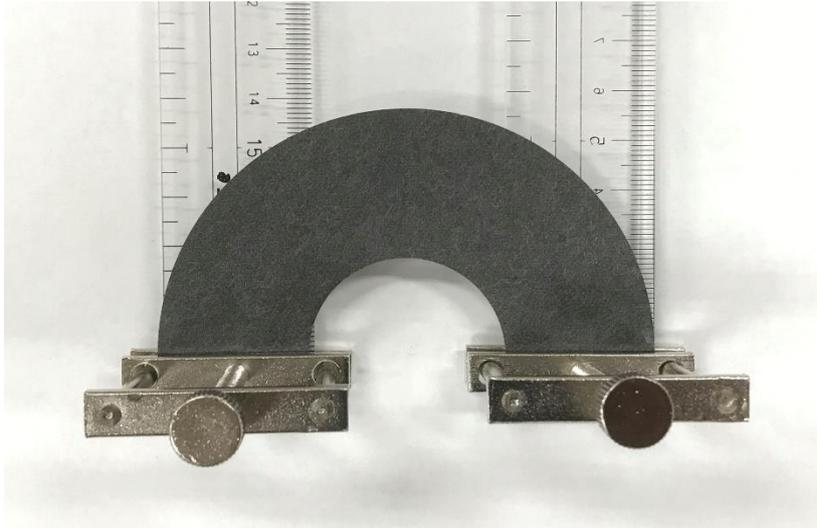


図 2.10 : 半輪形の CNP

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 2.11 のような長方形を考え、幅 $(b - a)$ 、長さ $[\pi(b + a)/2]$ として式(1.4)を用いると、抵抗は、

$$R = \rho_s \frac{\pi \frac{b+a}{2}}{b-a} = \frac{\pi \rho_s}{2} \frac{b+a}{b-a} \quad (2.18)$$

となる。これを近似値とする。

図 2.12 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 $\rho_s = 125 \text{ } \Omega/\text{sq.}$ 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。

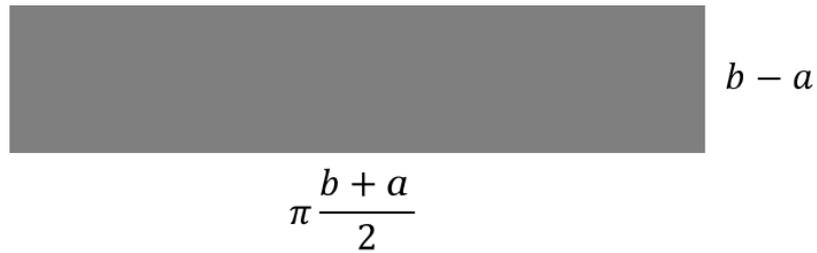


図 2.11：半輪形を長方形に近似する

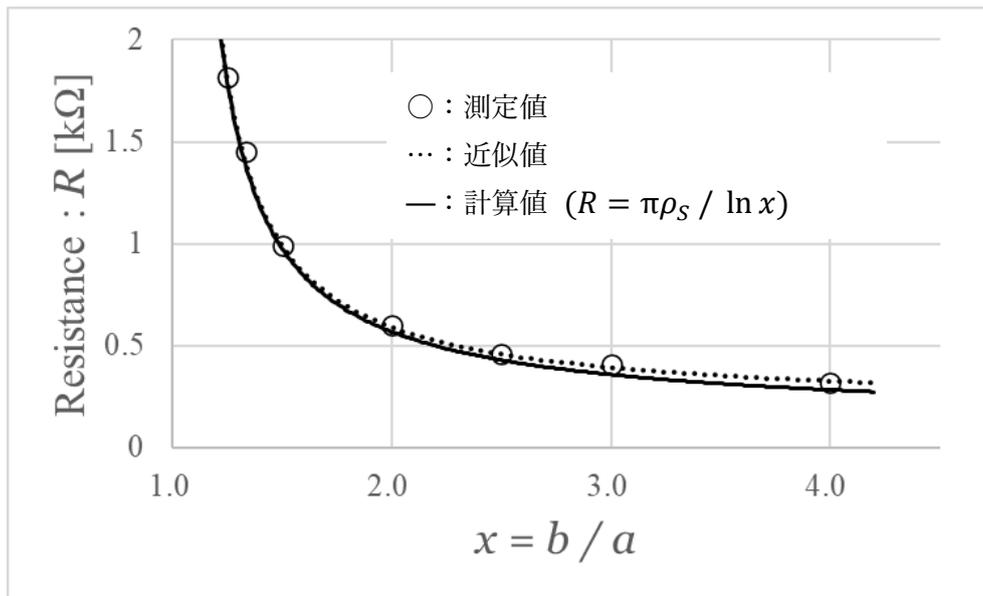


図 2.12：半輪形の抵抗の測定値と近似値，計算値

2.5 複数枚を重ねたCNPの電気抵抗値

図 2.13 は同じ形状の CNP を N 枚重ねた抵抗体を表している。この N 枚を重ねた CNP を 1 つの抵抗体と考え、両端に電圧を加えた場合、キャリアが通過する断面積は NDW となる。このように、CNP を重ねる枚数 N を変化させて抵抗値を測定することで、擬似的に抵抗値の断面積依存性を調べることも可能である。

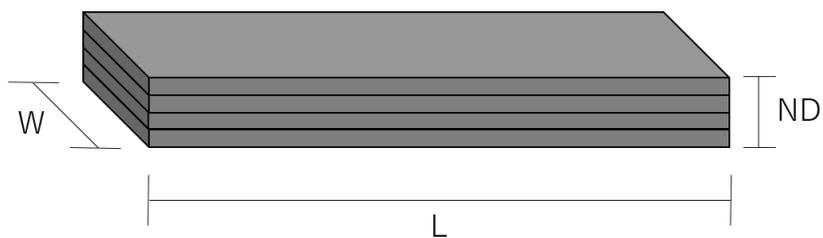


図 2.13：同じ形状の CNP を N 枚重ねて 1 つの抵抗体を表す

図 2.14 は、幅を 1.0 cm に固定し、長さを 10.0 cm 及び 20.0 cm とした CNP を 1 枚から 5 枚まで重ねて抵抗値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、幅依存性を示した場合と同様に、縦軸をコンダクタンスとしてプロットする。図 2.15 に示すように、測定結果は抵抗値が CNP の枚数（断面積）に反比例することをよく表している。

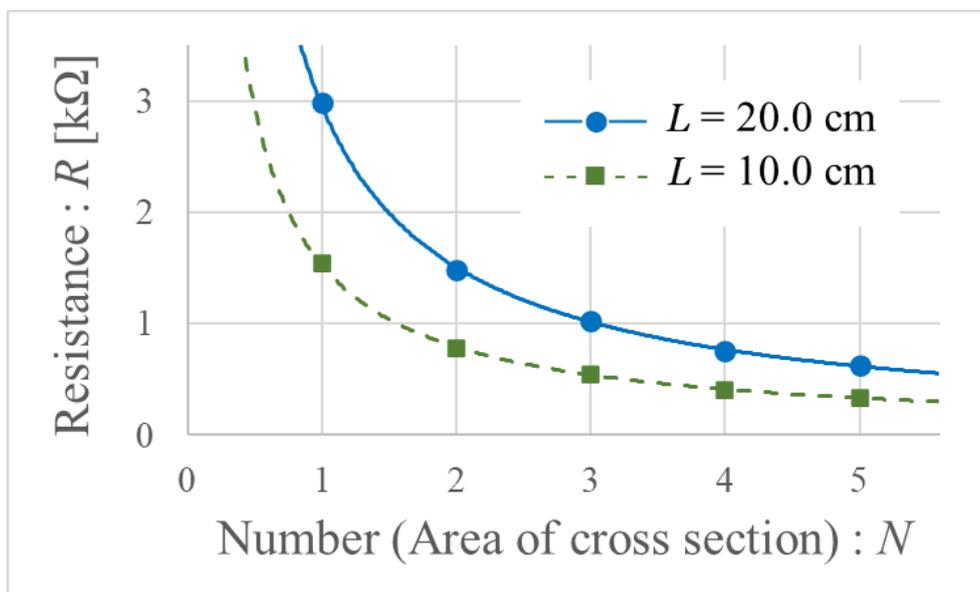


図 2.14 : CNP の抵抗値の枚数（断面積）依存性

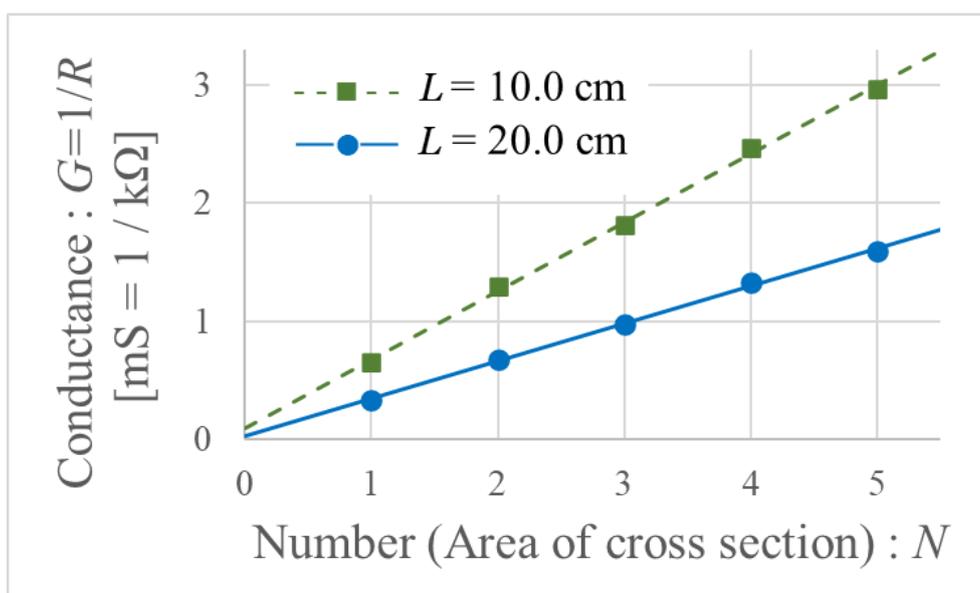


図 2.15 : CNP のコンダクタンスの枚数（断面積）依存性

2.6 CNPの合成抵抗

2.6.1 直列接続の合成抵抗

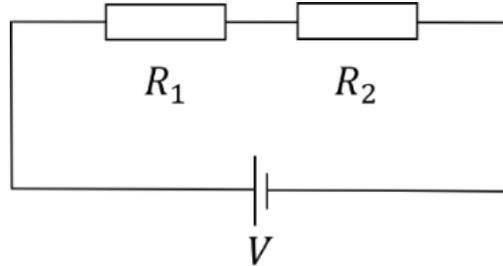


図 2.16：直列接続の回路図

図 2.16 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作る。この2つの抵抗を1つの抵抗とみなした場合の全体の抵抗 R （合成抵抗）を考える。

2つの抵抗 R_1 と R_2 を直列に接続したとき，回路全体に加わる電圧の大きさは，各抵抗に加わる電圧の大きさの和であるから，抵抗 R_1 と R_2 に加わる電圧をそれぞれ V_1 と V_2 とすると，

$$V = V_1 + V_2 \quad (2.19)$$

である。オームの法則の関係式(1.1)を用いると，抵抗 R_1 と R_2 を流れる電流をそれぞれ I_1 と I_2 とし，式(2.19)は

$$RI = R_1 I_1 + R_2 I_2 \quad (2.20)$$

と書き換えることができる。直列回路では，回路を流れる電流の大きさはどこも等しいことから，

$$I = I_1 = I_2 \quad (2.21)$$

である。したがって，式(2.20)は

$$\begin{aligned} RI &= R_1 I + R_2 I \\ RI &= (R_1 + R_2) I \end{aligned} \quad (2.22)$$

となり，両辺の等価性から，

$$R = R_1 + R_2 \quad (2.23)$$

を導くことができる。式(2.23)は直列接続における合成抵抗の関係式である。この公式の導出法は，中学校数学の範囲で計算できるが，オームの法則や電流・電圧についての十分な概念形成が前提となる説明方法である。

CNP 抵抗器による説明では，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 2.17 に示すような，等しい幅をもつ，長さ L の CNP 2つを直列接続した回路を考える。

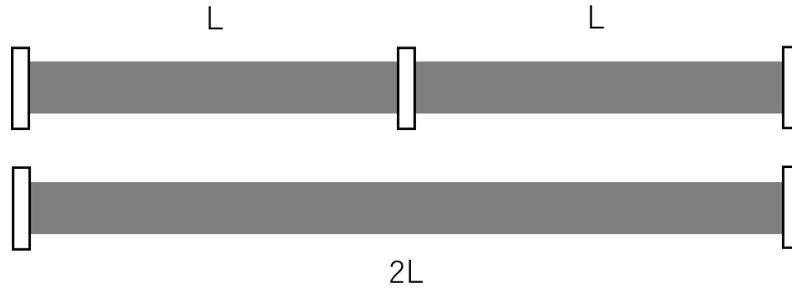


図 2.17 : CNP 抵抗器で示した, 2つの同じ抵抗を直列に接続した場合の合成抵抗

図 2.17 から明らかではあるが, この場合の合成抵抗は, 長さ $2L$ の CNP と等価である。ただし, 電極部分は長さに含まないものとする。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,

$$L_S = L_1 + L_2 \quad (2.24)$$

で与えられる長さ L_S の抵抗と等価である。数学的にも単純であり, 長さの和というイメージを伴って, 合成抵抗の関係式を理解することが可能である。これを数式で表すと,

$$R = \rho_S \frac{L_1 + L_2}{W} = R_1 + R_2 \quad (2.25)$$

となる。

表 2.4 は, 幅 1.0 cm, 長さ 6.0 cm の抵抗 R_1 と R_2 の CNP 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 CNP 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 2.4 : 直列接続の場合の合成抵抗の測定値

幅 : $W = 1.0$ cm	長さ : L [cm]	抵抗 : R [k Ω]
CNP 1 : R_1	6.0	0.80
CNP 2 : R_2	6.0	0.84
合成抵抗	6.0 + 6.0	1.64
2 枚分の長さの CNP : R_S	12.0	1.57

2.6.2 並列接続の合成抵抗

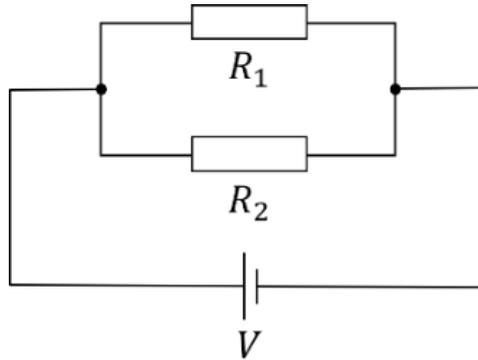


図 2.18：並列接続の回路図

図 2.18 のような，2つの抵抗 R_1 と R_2 を並列に接続した回路の合成抵抗 R を考える。並列回路において，回路全体を流れる電流の大きさは，各抵抗を流れる電流の大きさの和であるから，抵抗 R_1 と R_2 を流れる電流をそれぞれ I_1 と I_2 とすると，

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.26)$$

である。オームの法則の関係式(1.1)を用いると，抵抗 R_1 と R_2 に加わる電圧をそれぞれ V_1 と V_2 として，式(2.26)は

$$\frac{V}{R} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \quad (2.27)$$

と表すことができる。並列回路では，各抵抗に加わる電圧は電源の電圧 V に等しいから，

$$V = V_1 = V_2 \quad (2.28)$$

である。したがって，式(2.27)は，

$$\frac{1}{R}V = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)V \quad (2.29)$$

となり，両辺の等価性から，

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.30)$$

が得られる。この式(2.30)が並列接続における合成抵抗の関係式である。式(2.30)を R について解くと，

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.31)$$

となる。直列接続の場合と同様，中学校数学の範囲で導出できるが，オームの法則や電流，電圧についての十分な概念形成が前提となる説明方法である。



図 2.19 : CNP 抵抗器で示した, 2つの同じ抵抗を並列に接続した場合の合成抵抗

CNP 抵抗器による説明では, 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 2.19 に示すような, 長さが等しく, 幅 W の CNP 2枚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 CNP と等価である。

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,

$$W_p = W_1 + W_2 \quad (2.32)$$

で与えられる幅 W_p の抵抗と等価である。

表 2.5 は, 長さ 6.0 cm, 幅 1.0 cm の抵抗 R_1 と R_2 の CNP 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 CNP 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(2.30)に代入して得られる合成抵抗の理論値 $R = 0.42 \text{ k}\Omega$ は測定値とよく一致しており, R_p とも一致する。表 2.5 の結果から, CNP 抵抗器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 2.5 : 並列接続の場合の合成抵抗の測定値

長さ : $L = 6.0 \text{ cm}$	幅 : $W [\text{cm}]$	抵抗 : $R [\text{k}\Omega]$
CNP 1 : R_1	1.0	0.82
CNP 2 : R_2	1.0	0.86
合成抵抗	$1.0 + 1.0$	0.43
2枚分の幅の CNP : R_p	2.0	0.43

さらに, CNP 抵抗器を用いた説明では, 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,

$$G = G_1 + G_2 \quad (2.33)$$

である。これは, 式(2.30)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。

直列接続の場合と同様に、オームの法則を明示的に用いず、数学的にも単純であり、幅の和というイメージを伴って、合成抵抗の関係式を理解することが可能である。特に、並列接続の場合は、合成抵抗が逆数の和になることを、「電流の流れやすさ」(コンダクタンス)の和とすることで、明確に根拠を示すことができる。当然、数式で表すこともでき、式(1.4)と式(2.2)から、

$$G = \frac{W}{\rho_S L} \quad (2.34)$$

であり、

$$G = \frac{W_1 + W_2}{\rho_S L} = G_1 + G_2 \quad (2.35)$$

である。

2.7 長方形の切断とその合成抵抗

矩形及び台形の CNP 抵抗器を応用して、長方形の CNP を2つに切断する前後での抵抗値を比較する課題を想定することができる。例えば、図 2.20 及び図 2.21 のように、同じ形状をもつ2つの長方形の CNP を用意して左右両端に電極を接続した場合の切断前後の抵抗値を比較する。



図 2.20：長方形の CNP を平行に切り離す

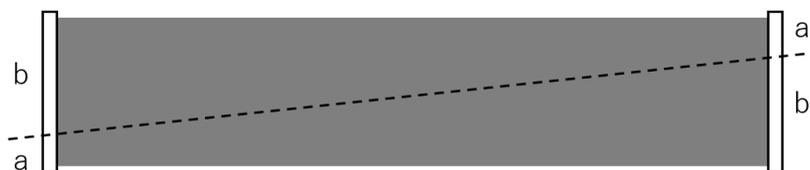


図 2.21：長方形の CNP を斜めに切り離す

図 2.20 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。一方で、破線に沿って切り離した図 2.21 の場合の切断前後の抵抗値(並列接続における合成抵抗)は変化し、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。形状の等しい2つの CNP 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、生徒の予想に反する結

果であれば、問題意識や探究意欲を高めることにつながる。

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つの台形の抵抗の1/2倍となるため、台形の抵抗値を表す式(2.6)から、

$$\frac{R}{2} = \frac{\rho_s L}{2} \frac{b}{b-a} \ln \frac{b}{a} \quad (2.36)$$

である。この結果は、破線に沿って切り離した場合に図 2.20 の抵抗よりも図 2.21 の抵抗が大きいことを示している。

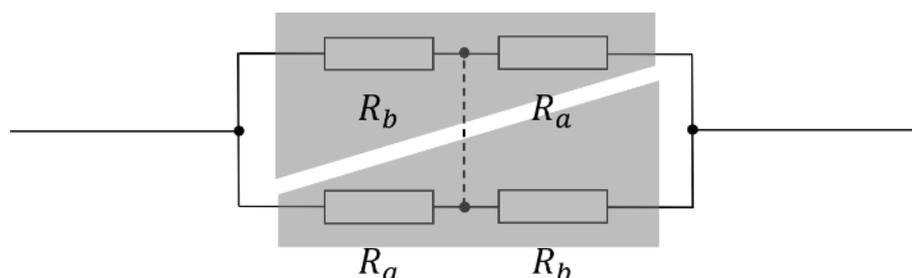


図 2.22：台形の並列接続を簡素化したモデル

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 CNP 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 2.22）。ただし、 $R_a > R_b$ である。

図 2.22 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、 $R_a = R_b$ の場合は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く、図 2.20 に対応する。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。

2.8 電流の流れのイメージをもつための電位の測定

図 2.23 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 $W \sin \theta$ の長方形との比較を試みる。表 2.6 は、 $L = 4.0 \text{ cm}$ 、 $W = 2.0 \text{ cm}$ 、 $\theta = \pi/3$ の場合の、幅 W と $W \sin \theta$ の長方形の抵抗の計算値と、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。

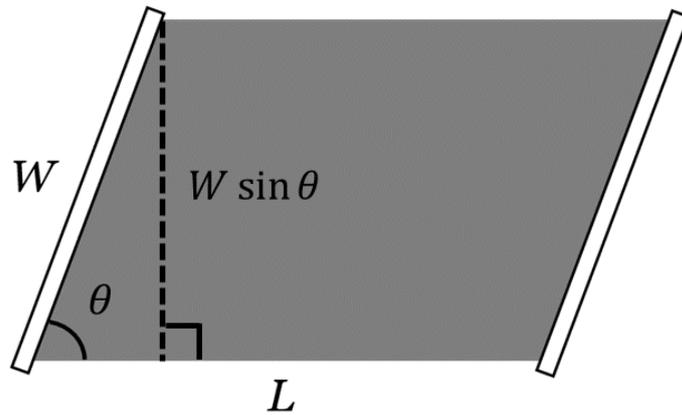


図 2.23：平行四辺形の CNP

表 2.6：2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 2.24 は図 2.23 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、○は 2.0 V、■は 4.0 V、◇は 6.0 V、●は 8.0 V である。

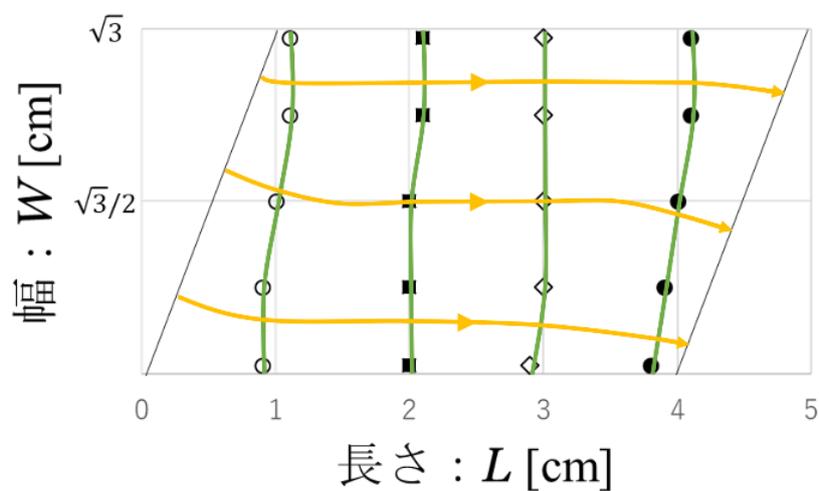


図 2.24：平行四辺形の電位を測定した結果

図 2.24 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、探究の幅が広がることが予測される。

ここでポイントとなるのは、2次元的な抵抗体中を流れる電流が一様でない場合の電場の分布や電流の流れ方及び抵抗値を計算する理論は極めて複雑であることである。つまり、ある部分は電流がよく流れて抵抗体の形状が抵抗値に大きく影響するが、他の部分はあまり電流が流れない、またはほとんど電流が流れずに、抵抗体の形状が抵抗値に与える影響が小さいことである。

2.9 簡易型電流チェッカー

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出すために、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、CNP 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、簡易型電流チェッカー（図 2.25）を開発した。

図 2.26 は電流チェッカーの回路図である。電流チェッカーは、直列に接続した公称電圧 1.5 V のアルカリマンガン乾電池（単 4 形）2 個と、青色 LED (SLA560BCT)、簡易的なアナログメータ（針式の電流計に相当し、LED の右部に配置）から構成されており、測定する抵抗と直列に接続して回路を形成している。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。

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。また、アナログメータは電流の大きさを 0 から 10 で表すようにした。

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 CNP に合わせ、他方の端子を測定したい長さに配置する。CNP 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（図 2.26 のⒶ）の針が振れる。

図 2.27 は長さ 3.0 cm、図 2.28 は長さ 19.0 cm とした、幅 2.0 cm の CNP に対して、電流チェッカーを用いて測定する様子である。2 つの図は、LED の点灯する明るさを比較することによって、抵抗の大小関係を把握することが可能であることを示している。

CNP の形状の変化に伴い、LED の明るさとアナログメータ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。CNP について、その抵抗の大きさの決定要因を主体的に、実験を通して見出すことが期待できる。

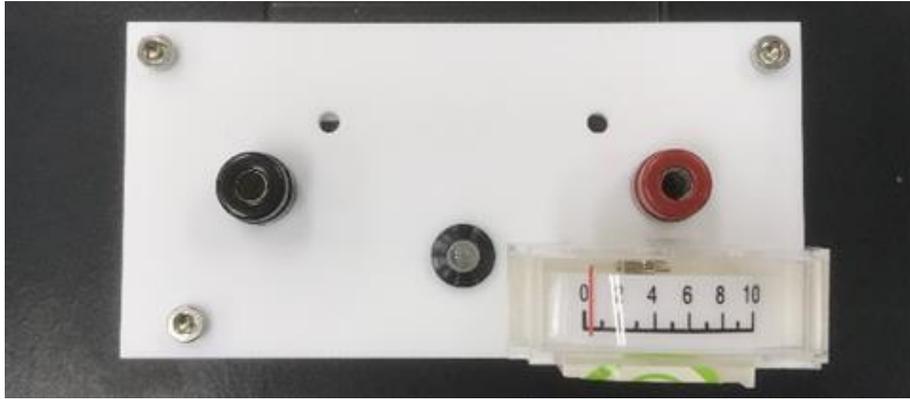


図 2.25：開発した簡易型電流チェッカー

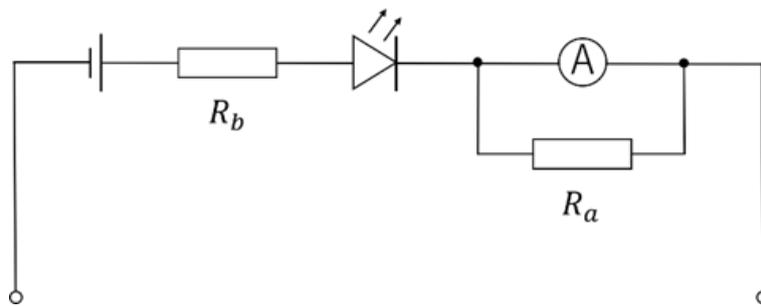


図 2.26：電流チェッカーの回路図

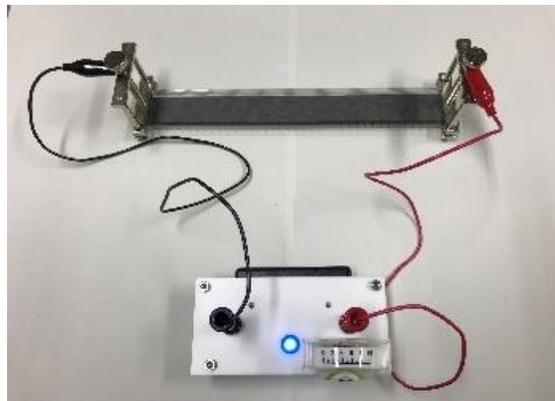
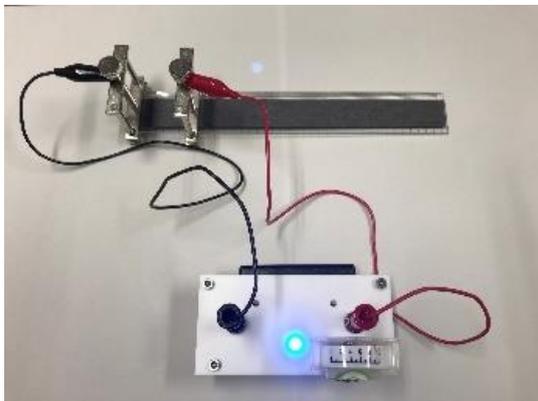


図 2.27：長さ 3.0 cm の CNP を測定する様子 図 2.28：長さ 19.0 cm の CNP を測定する様子

第3章

新指導法の開発

第3章

新指導法の開発

3.1 中学校理科「電流とその利用」

中学校理科「電流とその利用」は、小学校で形成された「電流」概念を基盤として、「電圧」概念や「電気抵抗」概念等が導入される単元である。この単元では、第1章で述べたように、以前から学習者の理解度や好嫌度に問題があるという指摘が多く、特に並列回路の合成抵抗に対する問題点が指摘されてきた。

表 3.1：大日本図書出版の教科書における「電流とその利用」単元の構成と指導のねらい

章・時間数	指導のねらい
1 電流と回路 (14 時間)	<ul style="list-style-type: none">・直列回路や並列回路をつくり、回路の電流や電圧を測定する実験を行い、回路の各点を流れる電流や各部に加わる電圧についての規則性を見いだして理解する。・金属線に加わる電圧と電流を測定する実験を行い、電圧と電流の関係を見いだして理解するとともに、金属線には電気抵抗があることを理解する。また、物質の種類によって抵抗の値が異なることや、2つの抵抗をつないだ場合の合成抵抗について知る。・電流によって熱や光などを発生させる実験を行い、熱や光などが取り出せること及び電力の違いによって発生する熱や光などの量に違いがあることを見いだして理解する。また、電力量や熱量について知る。
2 電流と磁界 (9 時間)	<ul style="list-style-type: none">・磁石や電流による磁界の観察を行い、磁界を磁力線で表すことを理解するとともに、コイルの回りに磁界ができることを知る。・磁石とコイルを用いた実験を行い、磁界中のコイルに電流を流すと力が働くことを見いだして理解する。・磁石とコイルを用いた実験を行い、コイルや磁石を動かすことにより電流が得られることを見いだして理解するとともに、直流と交流の違いを理解する。
3 電流の正体 (5 時間)	<ul style="list-style-type: none">・異なる物質同士をこすり合わせると静電気が起こり、帯電した物体間では空間を隔てて力が働くことを見いだして理解する。・静電気と電流には関係があることを見いだして理解する。・電流が電子の流れに関係していることを知る。・放射線の性質と利用について知る。

表 3.2 : 第 1 章「電流と回路」(14 時間) の授業時間と指導項目 (大日本図書)

時数	項 目 <項の目標>
4	1 回路の電流 A 電流の大きさ B 直列回路や並列回路を流れる電流 ◆1分野(3)ア(ア)㉗, イ <直列回路や並列回路をつくり, 回路の電流を測定する実験を行い, 回路の各点を流れる電流についての規則性を見いだして理解する>
3	2 回路の電圧 A 電圧の大きさ B 直列回路や並列回路に加わる電圧 ◆1分野(3)ア(ア)㉗, イ <直列回路や並列回路をつくり, 回路の電圧を測定する実験を行い, 回路の各部に加わる電圧についての規則性を見いだして理解する>
4	3 回路の抵抗 A 電流と電圧の関係 B 抵抗のつなぎ方と抵抗の大きさ ◆1分野(3)ア(ア)㉘, イ <電熱線に加わる電圧と電流を測定する実験を行い, 電圧と電流の関係を見いだして理解するとともに, 電熱線には電気抵抗があることを理解する。また, 物質の種類によって抵抗の値が異なることや, 2 つの抵抗をつないだ場合の合成抵抗について知る>
3	4 電流とそのエネルギー ◆1分野(3)ア(ア)㉙, イ <電流によって熱や光などを発生させる実験を行い, 熱や光などが取り出せること及び電力の違いによって発生する熱や光などの量に違いがあることを見いだして理解する。また, 電力量や熱量について知る>

大日本図書出版社の教科書(有馬ら, 2018)における「電流とその利用」単元は, 第1章「電流と回路」, 第2章「電流と磁界」, 第3章「電流の正体」の3部構成となっている。表 3.1 は, それぞれの章における標準授業時間数と指導のねらいを示している。第1章「電流と回路」では, 電流や電圧, 抵抗などの基本的な概念や, オームの法則, 合成抵抗, ジュール熱などの電気回路の基礎を学ぶ。第2章「電流と磁界」では, 電流により発生する磁界(磁

場)や磁界中の電流が受ける力、電磁誘導、直流と交流の違いについて学ぶ。第3章「電流の正体」では、静電気の性質、真空放電や電子の存在、放射線について学ぶ。本論文のテーマである抵抗の学習は第1章との関連が強い。

表3.2は、第1章「電流と回路」の指導項目である。「3 回路の抵抗」の「A 電流と電圧の関係」では、電熱線に加わる電圧と電流を測定する実験を行い、オームの法則を理解すると共に、抵抗の概念を導入する。また、電熱線には抵抗があることを知る。「B 抵抗のつなぎ方と抵抗の大きさ」では、物質の種類によって抵抗の値が異なることや、2つの抵抗を直列や並列に接続した場合の合成抵抗について学習し、直列及び並列の合成抵抗の公式を扱う。なお、抵抗の形状依存性は学習指導要領(文部科学省, 2018a)が示す学習内容に含まれていないため、当然、表3.2への記載は見られない。

しかしながら、実際の教科書(有馬ら, 2018)には、抵抗の形状依存性は発展的内容として記載されているだけでなく、合成抵抗の公式が成り立つ根拠として説明されている。教科書の合成抵抗の指導展開を、図3.1に示すように構造化した。抵抗の形状依存性は、実験方法や実験結果の例は示されず、「抵抗の大きさは長さに比例し、断面積に反比例する」という結論のみが簡単に記載され、長さを2倍にすると抵抗値は2倍となり、断面積を2倍にすると抵抗値は半分になることを、図を用いて説明されている。また、合成抵抗の公式の説明として、「抵抗の直列つなぎは、電熱線が長くなることと同じだと考えられる」や「抵抗の並列つなぎは、電熱線が太くなることと同じだと考えられる」と記述されている。すなわち、抵抗の形状依存性は、合成抵抗を理解するための根拠として用いて説明される重要な概念である一方で、指導要領の範囲外であり、発展的扱いとされているため、生徒にとって十分に理解できる記述とは言えない。この原因の一つに、既存の抵抗器教材(セメント抵抗器や電熱線など)では、このことを確認する実験が困難である点が考えられる。例えば、電熱線の長さを2倍にすることは、長さの測定によって理解できると考えられるが、断面積の把握は容易ではない。電熱線の断面積(円)の半径を r とすると、断面積は πr^2 となることは、小中学生でも理解できるだろう。しかし、電熱線の断面積を2倍にするには、半径 r を $\sqrt{2}$ 倍にする必要があり、平方根は中学校第3学年の数学で初めて学習する内容である。また、昭和62年初版発行の大日本図書出版の教科書のように、長さの等しい電熱線2本を並列接続して断面積を2倍にする方法も想定できるが、この手続き自体が断面積の増加と並列接続の等価性を利用したものであり、論理的な矛盾を含む。このように、既存の教材(セメント抵抗器や電熱線など)では、特に抵抗の断面積依存性を確認する実験が困難である。なお、抵抗の形状依存性を理論的に説明するためには、第1章で述べたキャリアの考え方が必要となるが、電子の流れのモデルを用いて電流を理解するためには、そのために数時間の授業を組んだ単元によって学習するのが一般的である。したがって、抵抗の形状依存性を理論的に解説することも容易でなく、電熱線の立体的な図や水流モデルの道幅を変化させた図を用いた簡易的な説明のみの記述となり、十分に理解できるものとは言えない。

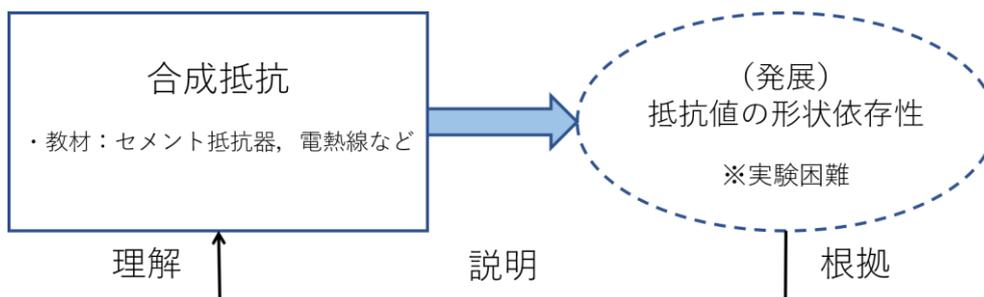


図 3.1：教科書（有馬ら, 2018）における合成抵抗の指導展開の構造

図 3.2 は図 3.1 の課題を克服するために考案した授業展開を表している。抵抗の形状依存性は「電気抵抗は電流の流れにくさである」という抵抗の基本的な概念と強く関連しているため、抵抗の形状依存性を学習した上で、その関係を根拠として合成抵抗を理解する学習指導法の開発により、既存のカリキュラムよりも論理的で実感を伴った理解ができる授業展開が可能になると考えた。

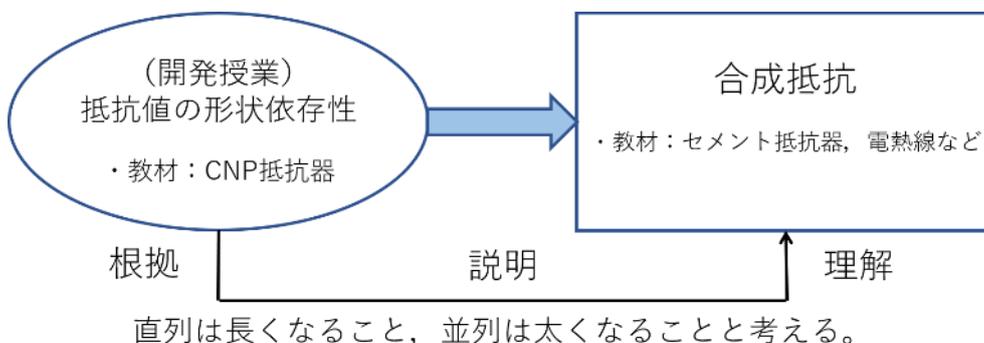


図 3.2：新指導法が目指す授業展開の構造

そこで、表 3.2 における「3 回路の抵抗」の「A 電流と電圧の関係」と「B 抵抗のつながり方と抵抗の大きさ」の間に導入することを想定して、表 3.3 に示すような、抵抗値の形状依存性を学習する授業を開発した。

CNP 抵抗器と電流チェッカーを用いることで、抵抗の形状依存性を定量的な実験から学習する授業展開（表 3.3）を構想することができる。また、CNP 抵抗器を活用することで、断面積を幅（太さ）に置き換えて平面的（2次元的）に捉えることが可能となる。電流チェッカーを用いた実験によって抵抗値の決定要因を定性的に予想した上で、デジタルマルチメータで測定することで「抵抗は長さに比例し、幅に反比例する」ことを定量的な実験結果から導くことができる。CNP 抵抗器を活用することで、抵抗体の形状を任意に変化させた場合の抵抗値の測定が可能となるため、抵抗の形状依存性について実感を伴った理解が期

待できる。

授業1 (表 3.3) では、最初に「抵抗とは何か」と問いかけ、「抵抗とは電流の流れにくさ」であることを教科書等で確認してから CNP 抵抗器を提示し、CNP 抵抗器の抵抗値を決定する要因を、電流チェッカーを用いた測定を通して事前に予想する。その後、デジタルマルチメータを用いた抵抗値の直接的 (量的) な測定によって量的関係を明らかにし、予想を検証することで、「抵抗は長さに比例し、幅に反比例する」ことを主体的に学ぶプロセスとした。

表 3.3 中の②では、抵抗値を決定する要因を抽出するために、様々な形状を変化させた CNP の抵抗を電流チェッカーの明るさで観察し、その経験を踏まえて予想できるようにする。表 3.3 中の⑤では、縦軸に抵抗値、横軸に長さまたは幅をとってグラフにまとめることで、実験結果から抵抗の形状依存性を見出す。図 3.3 は、この授業を受けた中学生の1人が、長さ 3.0 cm の CNP 抵抗器の幅を 1.0 cm, 2.0 cm, 3.0 cm と変化させて抵抗値を測定した結果である。図 3.3 のように、幅による依存性については、縦軸に抵抗値の逆数をとったグラフを作成することで、抵抗の逆数は幅に比例することから、抵抗は幅に反比例することを示す。なお、授業で使用したワークシートに記入例を記したものを付録 A に示す。

表 3.3：抵抗の形状依存性を学習する授業1の流れ

授業1「抵抗大きさは何によって決まるのだろうか」

①前時の振り返りをする

- ・抵抗とは電流の流れにくさである
- ・電流が小さいと抵抗は大きい
- ・電流が大きいと抵抗は小さい

②CNP 抵抗器と電流チェッカーを使って測定しながら、抵抗値を決定する要因を予想する

- ・LED が暗いと電流は小さい (抵抗は大きい)
- ・LED が明るいとき電流は大きい (抵抗は小さい)

③予想を発表し合う

- ・長さ ・太さ (幅, 断面積)

④様々な長さや幅の CNP の抵抗値をデジタルマルチメータで測定する

⑤結果を表やグラフにまとめる

⑥実験結果から考察する

- ・抵抗は長さに比例する
- ・長くなると電流は流れにくくなる
- ・抵抗は幅に反比例 (逆数に比例) する
- ・太くなると電流は流れやすくなる
- ・流れやすさは $1/R$ (抵抗) と表すことができる

⑦振り返りをする

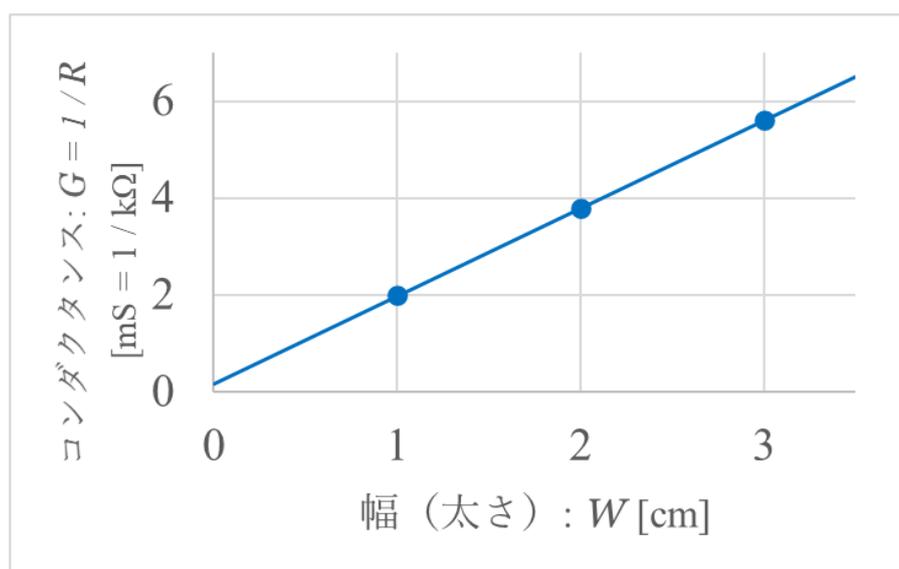


図 3.3：中学生が授業の中で測定した CNP の幅と抵抗値の逆数の関係

表 3.3 の下線部分は「電流の流れやすさ」すなわちコンダクタンスの考え方を導入する場面である。英国「アドバンス物理」(オグボーンら, 2004) では, 電気回路の学習にコンダクタンスの考え方を導入しており, 並列回路ではコンダクタンスの加算, 直列回路では抵抗の加算と使い分けるのが便利である(笠耐, 2000) という指摘がある。本授業では, 抵抗の形状依存性の授業で, 電流の流れやすさ(コンダクタンス)は幅に比例し, 幅は抵抗に反比例することを実験結果から学び, コンダクタンスは抵抗の逆数であることを知る。そして, 次時の合成抵抗の授業で直列は長さの和, 並列は幅の和(抵抗の逆数和)と等価であるとして, 抵抗の形状依存性を合成抵抗(公式)の理解に応用することを想定する。

授業 2「直列や並列の合成抵抗のきまり」では, 教科書に沿った展開の中で, CNP 抵抗器を実験教材として活用する(表 3.4)。授業 1 の実施後に合成抵抗を学習することで, 抵抗の形状依存性を根拠として合成抵抗の仮説を立て, 実験によって検証することを可能とした。例えば, 表 3.4 中の②では, 合成抵抗の仮説を設定する場面で, 直列回路であれば「抵抗が 2 個になるから全体の抵抗値も 2 倍になる」の根拠として, 2 個の抵抗を直列に接続すれば全体の抵抗の長さは 2 倍になることを用いた予想が想定できる。また, 並列回路であれば「電流が 2 つの方向に分かれるので, 抵抗値は小さくなる」の根拠として, 2 個の抵抗を並列に接続すれば全体の抵抗の幅は 2 倍になることを用いて予想し, 合成抵抗は 1/2 倍になることまで考えを深める生徒も想定できる。また, 表 3.4 中の⑤では, 「直列の合成抵抗は, 抵抗の長さの和と同じになる」や「並列の合成抵抗は, 抵抗の太さ(幅)の和と同じになる」と, 抵抗の形状依存性と合成抵抗を関連付けて理解できると考えられる。さらに, 表 3.4 中の⑥でも, 直列接続の合成抵抗の公式がそれぞれの抵抗値の和になることは当然のことであるが, 並列接続の合成抵抗の公式がそれぞれの抵抗値の逆数和になることも, 「電流の流れやすさ」を表すコンダクタンスの和と考えることができれば, 納得度を高める可能性があ

ると考えられる。なお、授業で使用したワークシートに記入例を記したものを付録 B に示す。

表 3.4：構想した合成抵抗を学習する授業 2 の流れ

授業 2 「直列や並列の合成抵抗のきまり」

- ①学習課題「同じ大きさの抵抗を 2 個つないだ回路では、全体の抵抗の大きさはどのようになるのだろうか」を提示する
 - ②直列や並列の合成抵抗のきまりについて予想し、仮説を設定する
 - <直列>
 - ・抵抗の数を増やすと全体の抵抗値も大きくなる
 - ・抵抗が 2 個になるから全体の抵抗値も 2 倍になる
 - <並列>
 - ・乾電池を並列につないだ時の電圧と同じように、抵抗値も変わらない
 - ・電流が 2 つの方向に分かれるので、抵抗値は小さくなる
 - ③長さ 5.0 cm、幅 1.0 cm の CNP を 2 つ使って、直列と並列の合成抵抗をデジタルマルチメータで測定する
 - ・デジタルマルチメータの使い方（教科書）を確認しながら実験をする
 - ④結果をまとめる
 - ⑤実験結果から考察する
 - ・直列の合成抵抗は、それぞれの抵抗値の和になる
 - ・直列の合成抵抗は、抵抗の長さの和と同じになる
 - ・並列の合成抵抗は、それぞれの抵抗値よりも小さくなる
 - ・並列の合成抵抗は、抵抗の太さ（幅）の和と同じになる
 - ・並列回路は、電流が流れやすくなる
 - ⑥合成抵抗の公式を学ぶ
 - ・ $R = R_a + R_b$ (直列)
 - ・ $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}$ (並列)
 - ⑦練習問題を解く
 - ⑧振り返りをする
-

図 3.4 は、CNP 抵抗器を用いて直列回路の合成抵抗値を測定する様子である。抵抗値の測定では、デジタルマルチメータ（RS PRO, 123-1938）を用いた。図 2.17 に示したように、直列回路の合成抵抗は長さの和と等価であるならば、抵抗値の和になることの視覚的理解が促されると考えられる。

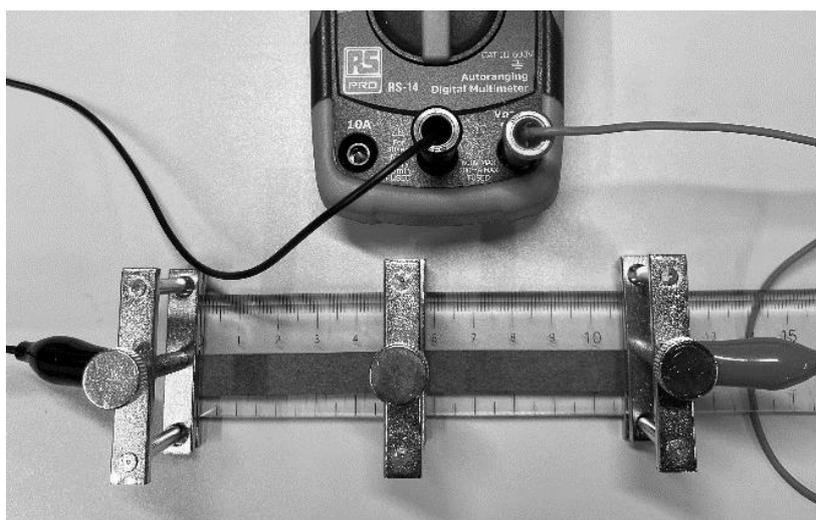


図 3.4 : CNP 抵抗器で直列合成抵抗を測定する様子

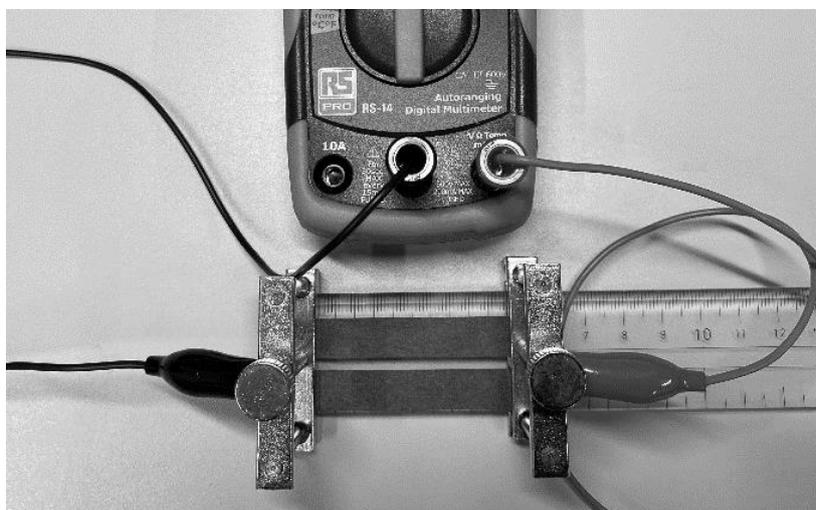


図 3.5 : CNP 抵抗器で並列合成抵抗を測定する様子

図 3.5 は、CNP 抵抗器を用いて並列回路の合成抵抗値を測定する様子である。図 2.19 に示したように、並列回路の合成抵抗は幅の和と等価であるならば、抵抗値は逆数和になることの視覚的理解が促されると考えた。

本授業計画において、授業 1 の内容は指導要領の範囲外であるため、既存の指導方法の代替ではなく、追加的に組み込むことを想定した。また、授業 2 は既存の授業計画におけるセメント抵抗器などの教材の代替を想定したものである。

3.2 高等学校物理基礎「電気」

高等学校物理基礎においても，中学校理科と同様に，CNP 抵抗器を用いて抵抗の形状依存性を学ぶ実験を取り入れた授業（表 3.5）が展開可能である。ただし，高等学校においては，当然のことであるが，抵抗の形状依存性を 3 次元的に扱う必要がある。授業では，学習課題を「電気抵抗値は抵抗体の長さや断面積にどのように依存するか実験により求める」として，CNP 抵抗器の概要や実験方法を説明した上で，3 人または 4 人グループで実験に取り組む。長さ 20.0 cm，幅 1.0 cm の CNP を各グループで 5 枚ずつ使用し，長さや枚数（断面積）を変化させて，デジタルマルチメータを用いて電気抵抗値を測定した。実験は，理論式(1.2)の検証ではなく，抵抗の形状依存性を探究する活動として設定した。

表 3.5：「物理基礎」試行的授業の流れ

学習内容
①学習課題「電気抵抗値は抵抗体の長さや断面積にどのように依存するか実験により求める」を提示する
②CNP の概要と実験方法を説明する <ul style="list-style-type: none">・ CNP はカーボンナノチューブを含ませて導電性を高めた紙である・ デジタルマルチメータを用いて CNP 抵抗器の抵抗値を測定する
③抵抗体の長さや抵抗値の関係について探究する <ul style="list-style-type: none">・ 抵抗体の長さや抵抗値の関係について予想する・ CNP の長さを変化させて抵抗値を測定する・ 測定結果をまとめて考察する
④抵抗体の断面積や抵抗値の関係について探究する <ul style="list-style-type: none">・ 抵抗体の断面積や抵抗値の関係について予想する・ CNP の断面積（重ねる枚数）を変化させて抵抗値を測定する・ 測定結果をまとめて考察する
⑤抵抗値の形状依存性のまとめをする <ul style="list-style-type: none">・ 抵抗値は抵抗体の長さに比例する・ 抵抗値は抵抗体の断面積に反比例する・ 関係式における定数を抵抗率という・ $R = \rho \frac{l}{S}$
⑥探究テーマ「最も抵抗値の大きい抵抗を作成する」に取り組む <ul style="list-style-type: none">・ 探究テーマについて予想し，実験の計画を立てる・ CNP の形状を変化させて抵抗値を測定し，仮説を検証する・ 実験結果をまとめて考察する
⑦全体のまとめと振り返りをする

3.3 高等学校理数探究

先述の通り、高等学校では抵抗の形状依存性を3次元的に扱うことが必須であるが、式(1.2)を十分に理解した上で、改めて抵抗体を2次元的に扱い、矩形以外の形状を含めた様々な抵抗値について探究する学習活動が展開可能である。例えば、表 3.6 に示す授業の流れでは、対象生徒は抵抗の形状依存性について既習であることを想定し、検証実験として、長さや幅の異なる CNP の抵抗値をデジタルマルチメータで測定する。実験結果から算出したシート抵抗を活用して、指定された電気抵抗値 (1.0 kΩ) をもつ CNP 抵抗器の作製や、自分で考えた任意の形状の抵抗値を探究する活動を行う。

本指導案では、作製する抵抗値を 1.0 kΩ と指定したが、任意の値をもつ抵抗器の作製も当然可能である。例えば、回路内で LED 等を点灯させるために必要な抵抗値を算出し、その値をもつ抵抗器を作製する探究活動も展開することができる。

本教材を活用した「探究」の授業を通して、抵抗の理解が深まる、生徒主体の探究的な学習活動の実現を目指した。また、新設科目「理数探究」においても本教材を活用することで、探究的な学習の充実を図り、探究の過程で仮説を検証する活動が展開可能と考えられる。

表 3.6: 「理数探究」 試行的授業の流れ

学習内容
①CNP の概要と実験方法を説明する
・ CNP はカーボンナノチューブを含ませて導電性を高めた紙である
・ デジタルマルチメータを用いて CNP 抵抗器の抵抗値を測定する
②抵抗が物質の長さに比例し、断面積に反比例することを検証する
・ 6 種類の幅 (0.5cm, 1.0cm, 1.5cm, 2.0cm, 2.5cm, 3.0cm) の CNP の長さを変化させて抵抗値を測定する
・ データをグラフにまとめてシート抵抗を計算する
③指定された値 (1.0 kΩ) をもつ抵抗器を作成する
・ 長さや幅を予想し、実験の計画を立てる
・ CNP の形状を変化させて抵抗値を測定し、仮説を検証する
・ 実験結果をまとめて考察する
④任意の形状の抵抗値を探究する
・ 任意の形状を決定し、抵抗値を予測する
・ CNP を任意の形状に加工し、抵抗値を測定する
・ 実験結果をまとめて予測値と比較し、考察する
・ 必要に応じて想定したモデルを修正し、試行錯誤する
⑤探究の過程を振り返り、学習のまとめをする

3.4 CNP の物質的特性に着目した授業内容

前節までは、CNP 抵抗器を既存の抵抗器教材の代替として活用した授業内容である。しかしながら、CNP はそれ自体が大変興味深い新素材であるため、CNP の物質的特性に着目した内容を取り入れる可能性も想定することができる。

CNP は最先端ナノテクノロジーを用いて開発された機能性シート（特殊東海製紙，2009）である。CNP の性能としては、優れた導電性と強度特性の両立、電磁波シールド特性、発熱特性などが挙げられる。用途の例としては、電磁波のシールド材や、電池部材などが想定されている。また、薄く、加工性に優れていることから、電子部品の小型化の発展に貢献できる可能性もあるとされている。

CNP が従来の導電紙と比較して特に優れている性質は、導電性である。従来の導電紙よりも抵抗値を下げることはできたのは、CNP に含まれているカーボンナノチューブ（CNT）の性質による。CNT は 1991 年に飯島澄男博士によって発見された炭素のみで構成されている直径がナノメートルサイズの円筒（チューブ）状の物質であり、炭素原子が六角形に配置されたベンゼン環を平面上に敷き詰めたシートが円筒状になった、非常に興味深い構造をしている（産業技術総合研究所，2019）。CNT は、黒鉛やダイヤモンドと共に、炭素でできた単体として、また新しく発見された物質として、中学校理科の教科書（有馬ら，2018）や高等学校化学基礎の教科書（竹内ら，2012）にも記載されている。CNT は化学的及び熱的に安定しており、密度はアルミニウムの半分程度と小さい一方、鋼の約 20 倍の強度をもつとされる。また、優れた導電性や熱伝導性を併せもつ。CNT はナノテクノロジーの基盤となる素材として今後の産業に大きな影響を与えることが期待されており、導電性・熱伝導性・耐熱性を備えたゴムとの複合材料や、軽量で高強度な炭素繊維強化プラスチック（CFRP）との複合材料、許容電流が金属以上になる金属との複合材料などの実用化に向けて研究が進められている。具体的には、燃料電池やコンデンサー、配線材料、半導体デバイス、医療用材料、自動車、航空機、建築材料などがある。

以上のように、CNP 及び CNT の物質的特性は非常に興味深く、先端科学技術の活用や、科学技術の発展という側面からの教材としても、非常に優れていると考えられる。さらに、日常生活や企業との関連という観点からも適切な教育内容となる。実際に、本教材の高等学校物理基礎や理数探究における活用では、CNP 及び CNT の物質的特性や、開発の一端を紹介することが想定される。一方で、中学校理科における授業実践では、電気回路の授業計画の中の限られた時間では、簡単な紹介程度になる可能性も考えられる。

したがって、CNP 及び CNT の物質的特性に着目した授業内容を取り入れることは可能であり、学習者が興味や関心をもつ魅力的な教材となる可能性が高いと考えられる。なお、物質的特性をテーマとした授業内容においては、中学校や高等学校などの校種や学年、教科や科目、学習者の実態を踏まえて構成する必要があることは当然である。

第4章

指導法の実践と効果の検証

第4章

指導法の実践と効果の検証

4.1 中学校理科「電流とその利用」実践1

4.1.1 授業実践と分析方法

2019年9月、愛知県内の公立中学校第2学年3学級を対象として授業実践を行った。表4.1は各学級の実践の流れを示す。実験群1、実験群2、統制群を設定し、実践校の実態に合わせて、大日本図書出版の教科書「理科の世界2」（有馬ら，2018）に沿って授業を展開した。

表 4.1：授業実践と質問紙調査の流れ

実験群1 (25名)	実験群2 (26名)	統制群 (24名)
授業1	授業2	統制授業
↓	↓	↓
授業2	質問紙回答	質問紙回答
↓	↓	↓
質問紙回答	授業1	授業1

実験群1は授業1と授業2を実施した後、質問紙に回答した。実験群2は授業2を実施した後、授業1を実施する前に質問紙に回答することで、本授業計画の一部である授業2のみによる影響が表出するようにした。統制群で行われる統制授業では、授業2の展開の中で、CNP抵抗器の代わりに教科書に掲載されているセメント抵抗器を使用した。つまり、授業2に対する統制授業である。ここで、授業1は指導要領の範囲外の内容を追加的に組み込むことを想定しているため、授業1に対する統制授業を設定しない。したがって、実践群1の質問紙回答までの授業時間数は授業1に相当する1時間分多くなる。これは、本研究の目的が新しい学習内容の導入による時間数の増加を含めた検証であることによる。

実験群1と統制群を比較することで、既存の指導方法に対して、構想した授業を実施することによる効果を分析した。これを検証1-1とする。また、実験群2と統制群を比較することで、授業計画の一部である授業2、すなわちCNP抵抗器を活用した合成抵抗の授業による効果を分析した。これを検証1-2とする。さらに、実験群1と実験群2を比較することで、授業1の実施による効果を分析した。これを検証1-3とする。

実践の条件を揃えるために、すべての群において同一のワークシート（付録A, Bを参照）を用いた。また、授業者の差異による影響を防ぐために、著者らではなく普段の担当者が授

業を行った。授業者は実験群 1 を担当する教員と、実験群 2 及び統制群を担当する教員の 2 名である。

開発した指導方法の効果を検証するために、学習者に対して質問紙調査を行った。質問項目（表 4.2）は、構想した授業を実施する以前の学習内容であるオームの法則に対する理解度、実践内容である合成抵抗の理解度、納得度、授業後の感想である。

質問項目（表 4.2）では、授業実施後の学習効果を「抵抗とは何か」という抵抗の定義の他に、「記憶した公式の再現、公式の記号を移項する能力、式に値を代入して計算する能力、納得度の自己認識値」と、「令和の日本型学校教育」（中央教育審議会、2021）が目指す、子供たちに育むべき資質・能力に対応した内容を含んでいる。令和 3 年に取りまとめられた中央教育審議会答申では、令和の時代の子供たちに必要な資質・能力を育むためには、新学習指導要領の着実な実施が重要とされている。中学校学習指導要領における理科の目標（文部科学省、2018a）では、科学的に探究するために必要な資質・能力を育成することを目指している。「記憶した公式の再現、公式の記号を移項する能力、式に値を代入して計算する能力」は、科学的に探究するために必要な知識及び技能や、それらを活用して科学的に探究する力に対応している。また、「納得度の自己認識値」は子供が自己調整しながら学習を進めるために必要な「学びに向かう力」に対応している。

合成抵抗の理解度を把握すると同時に、公式に対する納得度を 4 件法に基づいて数値化した。理科教育学の研究において、学習者の納得度を調査した手法には、5 件法（川上ら、2003）や、4 件法（益子ら、2009）がある。本研究では、問題の正答率と共に納得度について議論している益子ら（2009）の手法を選択し、合成抵抗の公式に対する納得度を「1：全然納得できなかつた、2：あまり納得できなかつた、3：やや納得した、4：とても納得した」の中から選択する形式とした。ただし、正しい公式に対する納得度を調査するため、納得度の集計においては、直列及び並列のそれぞれにおける公式の記述（表 4.2 の 3 (1) 及び 4 (1)）に正答した者のみを分析の対象とした。

各群の得点に対して、マン・ホイットニーの U 検定を用いて分析した。マン・ホイットニーの U 検定は、ノンパラメトリックな手法で、正規分布かどうかに関わらず独立な 2 群の得点差を評価することができる。また、相関係数に基づいた、変数間の関係の強さを示す効果量 r を算出した。J. Cohen（1988）における効果量の大きさの目安では、0.1 で小程度、0.3 で中程度、0.5 で大程度としている。

質問紙調査に加えて、授業観察とビデオカメラによる記録を行い、授業中の発話や行動を文章で記録し、考察した。また、授業者に対して自由記述式の質問紙調査とインタビュー調査を行い、本授業計画に関する評価を得た。

以上のように、構想した授業計画を限られた実践条件の中で実施することによる効果を、質問紙調査に基づく様々な学力の量的分析や、授業の様子、自由記述式の感想を根拠として検証した。

表 4.2：質問紙の内容

質問内容
<p>1 次の (1) から (3) までの質問を読んで最も適当なものを①から④までの中からそれぞれ1つずつ選んで○を付けなさい。</p> <p>(1) 電流と電圧は (①：比例する, ②：反比例する, ③：比例でも反比例でもないが関係がある, ④：関係ない)。</p> <p>(2) 電流と抵抗は (①：比例する, ②：反比例する, ③：比例でも反比例でもないが関係がある, ④：関係ない)。</p> <p>(3) 電圧と抵抗は (①：比例する, ②：反比例する, ③：比例でも反比例でもないが関係がある, ④：関係ない)。</p>
<p>2 (電気) 抵抗とは何か, 説明しなさい。</p>
<p>3 抵抗の大きさが R_a と R_b の 2 個の抵抗を<u>直列</u>につないだ場合について次の (1) から (3) までの問いに答えなさい。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div data-bbox="229 987 1021 1216"> <p>(1) 全体の抵抗 R を表す式を R_a と R_b を用いて書きなさい。</p> <p>(2) R_a は 20Ω, R_b は 30Ω であった。 このとき, 全体の抵抗を計算しなさい。</p> <p>(3) (1) の式についてどれくらい納得できましたか。最もあてはまるもの1つを○でかこみなさい。</p> <p style="text-align: center;"> 全然納得できなかった あまり納得できなかった やや納得した とても納得した (1 . . . 2 . . . 3 . . . 4) </p> </div> <div data-bbox="1077 898 1340 1077" style="text-align: center;"> </div> </div>
<p>4 抵抗の大きさが R_a と R_b の 2 個の抵抗を<u>並列</u>につないだ場合について次の (1) から (3) までの問いに答えなさい。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div data-bbox="229 1469 1021 1697"> <p>(1) 全体の抵抗 R を表す式を R_a と R_b を用いて書きなさい。</p> <p>(2) R_a は 20Ω, R_b は 30Ω であった。 このとき, 全体の抵抗を計算しなさい。</p> <p>(3) (1) の式についてどれくらい納得できましたか。最もあてはまるもの1つを○でかこみなさい。</p> <p style="text-align: center;"> 全然納得できなかった あまり納得できなかった やや納得した とても納得した (1 . . . 2 . . . 3 . . . 4) </p> </div> <div data-bbox="1077 1379 1340 1603" style="text-align: center;"> </div> </div>
<p>5 授業についての感想を自由に書いてください。</p>

4.1.2 検証1-1

開発した授業を実施した実験群1と既存の指導方法を実施した統制群を比較することで、本指導方法による効果を分析した。

実践前の学習内容であるオームの法則について、各群に質問紙調査（表4.2の1(1)から(3))を行った結果、実験群1と統制群の比較において $p=0.614$ 、効果量 $r=0.072$ であった。したがって、 $p>0.05$ で有意な差は認められず、効果量は小さいため、両群の均等性を仮定した。

質問項目2「抵抗とは何か」に対する回答は記述式であり、「電流」または「電気」と「流れにくさ」に関する記述があるものを正答とした。主な回答例を表4.3に示す。「電気の抵抗」のみの記述は、「電気抵抗」に「の」を書き加えたものであり、説明として不十分であると判断した。

表4.3：質問項目2の回答例と評価

評価	回答例
正答	電流の流れにくさ 電気の流れにくさ 電流を流れにくくするもの 電流の流れを流れにくくするもの
誤答	電流を止めるもの 電気の大きさ 電気の抵抗

質問項目3(1)「直列合成抵抗・公式の記述」では「 $R=R_a+R_b$ 」または「 $R_a+R_b=R$ 」と記述したものを正答とした。質問項目4(1)「並列合成抵抗・公式の記述」も同様に「 $1/R=1/R_a+1/R_b$ 」または「 $1/R_a+1/R_b=1/R$ 」と記述したものを正答とした。すべての採点は著者らが行い、その結果について2名の授業者と協議した。

表4.4は、質問紙の回答をマン・ホイットニーのU検定を用いて分析した結果である。質問項目2「抵抗とは何か」($p<0.001, r=0.831$)と、3(3)「直列合成抵抗・納得度」($p<0.001, r=0.730$)及び4(1)「並列合成抵抗・公式の記述」($p<0.001, r=0.839$)について $p<0.01$ で有意差が認められ、実験群1は統制群より得点が高く、それぞれの効果量 r は大きいことが明らかとなった。また、他の項目では $p>0.05$ で有意差は認められなかった。したがって、①抵抗とは何かに対する回答、②直列合成抵抗の公式に対する納得度、③並列合成抵抗の公式の記述の3点において、実践した授業による効果が示された。

有意差が認められなかった3(1)「直列合成抵抗・公式の記述」及び3(2)「直列合成抵抗・計算問題」の正答率は両群とも9割以上と高い値を示した。また、4(2)「並列合成抵抗・

計算問題」の正答率は両群とも1割程度であり、4(3)「並列合成抵抗・納得度」の平均値は実験群1で2.460、統制群で2.250であった。

表 4.4：検証1-1の質問紙調査結果（マン・ホイットニーのU検定による分析）

質問項目	<i>p</i>	<i>r</i>
2 抵抗とは何か	**0.000	0.831
3 直列合成抵抗		
(1) 公式の記述	0.307	0.146
(2) 計算問題	0.531	0.089
(3) 納得度	**0.000	0.730
4 並列合成抵抗		
(1) 公式の記述	**0.000	0.839
(2) 計算問題	0.724	0.050
(3) 納得度	0.426	0.148

p* < 0.05, *p* < 0.01

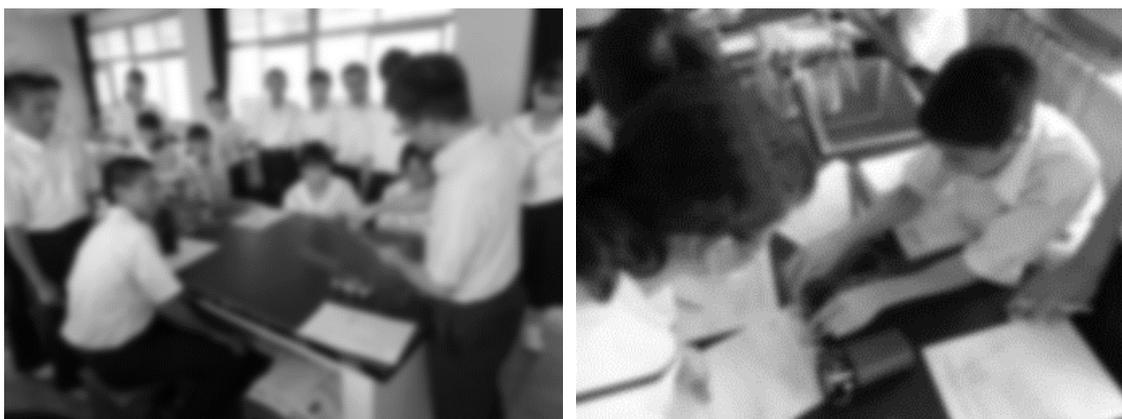


図 4.1：実験群1で授業1を実践している様子

表 4.5：実験群 1 で実施した授業 1 の発話記録（抜粋）

発言者	発話内容
T	考察で、このデータを分析して言ってください。
C ₁	だいたい 500Ω, 1000Ω, 1500Ω と抵抗が長さに比例していると思います。
C ₂	幅が大きいほど、抵抗は小さくなる。
C ₃	長いほうが流れにくいから抵抗は大きい。
C ₄	幅が大きいと抵抗は小さいです。 (中略)
T	電流の流れやすさを、抵抗 R を使ってどのように表すことができるでしょうか。 (中略)
C ₅	反比例だから R 分の 1 になると思います。

T：教師，C_N：生徒，N：Number

図 4.1 は、実験群 1 で授業 1 を実践している様子である。教師は CNP 抵抗器と電流チェッカーの使い方を説明し、「抵抗の大きさは何によって決まるのだろうか」と発問した。生徒は電流チェッカーで測定しながら、抵抗値を決める変数について「長さ、太さ（幅）、面積、厚さ」などの予想をワークシートに記入することができた。

表 4.5 は、実験群 1 で授業 1 を実施した際の発話記録を抜粋したものである。実験結果から考察する場面で「長いほうが流れにくいから抵抗は大きい」や「幅が大きいほど、抵抗は小さくなる」と説明する生徒が確認された。生徒は抵抗値が長さに比例することや、幅に反比例することを実験結果から考察することができた。また、電流の流れやすさについて、抵抗値が太さに反比例する関係から $1/R$ と、コンダクタンスの考え方をを用いて説明する生徒が確認された。

英国「アドバンシング物理」（オグボーンら，2004）や笠（2000）の指摘から、授業 1 で得たコンダクタンスの考え方が、授業 2 の並列回路の合成抵抗の理解に前向きな影響を及ぼした可能性があると考えられる。

また、福山（2000）の指摘と関連して、抵抗体の形状と電流の流れやすさの関係をイメージ[21]して抵抗を理解しようとする姿勢が、「抵抗とは何か」に対する理解度を高めた要因の一つである可能性が考えられる。

表 4.6：実験群 1 で実施した授業 2 の発話記録（抜粋）

発言者	発話内容
T	予想を言ってみましょう。
C ₁	直列の抵抗は大きくなる。
C ₂	長さが大きくなるから抵抗も大きくなる。
C ₃	前の実験で長いほうの抵抗が大きくなった。
C ₄	長さが 2 倍になるから抵抗も 2 倍になる。
C ₅	並列のほうで、1 つ分より小さくなる。
C ₆	並列は長さが同じだから 1 つ分と同じ。
C ₇	太さが太くなるから 1 つ分より小さい。
	(中略)
T	考察をしましょう。
C ₈	直列は 2 倍、並列は 1/2 倍、3 つでは 1/3 倍。

T：教師，C_N：生徒，N：Number

表 4.6 は、実験群 1 で授業 2 を実施した際の発話記録の一部である。合成抵抗の実験前に予想をする場面では、直列回路において「長さが大きくなるから抵抗も大きくなる」や「長さが 2 倍になるから抵抗も 2 倍になる」と、授業 1 で学んだ抵抗体の形状と抵抗値の関係を根拠として仮説を立てる生徒が確認された。また、並列回路では「長さが同じだから 1 つ分と同じ」や「太くなるから 1 つ分より小さい」と仮説を立てることができた。実験による仮説の検証では「直列は 2 倍、並列は 1/2 倍、3 つでは 1/3 倍」と、得られたデータから考察して合成抵抗の法則を導くことができた。発話記録の分析から、生徒が自ら仮説を立てて検証実験をすることで合成抵抗を理解する過程を推察することができた。

実験群 1 の生徒の感想（表 4.7）では、授業に対して「楽しかった」や「分かりやすかった」という前向きな回答が多かった。また、「並列の抵抗の式が難しいと感じたが、CNP を使ったら少しずつ分かってきた」や「並列が何でその式になるのか分からなかったけど、CNP を使うと式が分かりやすかった」と記述した生徒がいたことから、授業 2 で CNP 抵抗器を使用した効果として合成抵抗の理解を深めたことを確認することができた。

表 4.7：実験群 1 生徒の授業後の感想（まとめ）

記述内容
<ul style="list-style-type: none"> ・楽しかった。分かりやすい。実験がおもしろい。 ・並列の抵抗の式が難しいと感じたが、CNP を使ったら少しずつ分かってきた。 ・紙をはさみにくい。定規で長さをはかりやすい。 ・CNP はとても使いやすい。 ・結果が分かりやすく出た。きまりが分かった。 ・図をかくのが分かりやすい。 ・抵抗のことがよく分かった。 ・実験をする時に、なぜこの値になるのか考えるのが楽しかった。 ・太さや長さが違うものを使えてとても分かりやすかった。 ・太さや長さが違うものを比べて楽しく学べた。 ・並列が何でその式になるのか分からなかったけど、CNP を使うと式が分かりやすかった。

4.1.3 検証 1 – 2

授業 2 を実施した実験群 2 と統制授業を実施した統制群を比較することで、合成抵抗の実験教材として CNP 抵抗器を使用することの有効性を検討する。

実践前の学習内容（表 4.2 の 1 (1)から(3)）に対する質問紙調査の結果から、実験群 2 と統制群の比較において $p = 0.294$ ，効果量 $r = 0.148$ であった。したがって、 $p > 0.05$ で有意な差は認められず、効果量は小さいため、両群の均等性を仮定した。

表 4.8：検証 1 – 2 の質問紙調査結果（マン・ホイットニーの U 検定による分析）

質問項目	p	r
2 抵抗とは何か	**0.000	0.534
3 直列合成抵抗		
(1) 公式の記述	0.954	0.008
(2) 計算問題	0.137	0.210
(3) 納得度	**0.000	0.583
4 並列合成抵抗		
(1) 公式の記述	**0.000	0.754
(2) 計算問題	0.966	0.006
(3) 納得度	0.351	0.176

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

表 4.8 は実験群 2 と統制群の質問紙調査の結果である。実験群 1 と同様に、質問項目 2 「抵抗とは何か」 ($p < 0.001, r = 0.534$) と、3 (3) 「直列合成抵抗・納得度」 ($p < 0.001, r = 0.583$)、4 (1) 「並列合成抵抗・公式の記述」 ($p < 0.001, r = 0.754$) について $p < 0.01$ で有意差が認められ、実験群 2 は統制群より得点が高いことが示された。また、それぞれの効果量 r は、実験群 1 ほどではないが大きな値であった。一方で、他の項目では $p > 0.05$ で有意差は認められなかった。したがって、実験群 1 と同様に、①抵抗とは何かに対する回答、②直列合成抵抗の公式に対する納得度、③並列合成抵抗の公式の記述の 3 点において、CNP 抵抗器の有効性が示された。

なお、有意差が認められなかった 3 (1) 「直列合成抵抗・公式の記述」及び 3 (2) 「直列合成抵抗・計算問題」の正答率は両群とも 9 割以上と高く、4 (2) 「並列合成抵抗・計算問題」の正答率は両群とも 1 割程度と低かった。また、4 (3) 「並列合成抵抗・納得度」の平均値は実験群 2 で 2.531、統制群で 2.250 であった。これらの結果も実験群 1 と同様の傾向である。

表 4.9 は、実験群 2 における授業 2 の発話記録の一部である。合成抵抗の実験前に予想をする場面では、直列回路で「2 つの抵抗の和が大きな 1 つの抵抗になる」、並列回路で「電流が分かれて、1 つより小さくなる」と発言する生徒が確認された。このように、電流の流れをイメージして考える生徒が確認された一方で、実験群 1 のように抵抗体の形状に着目した発言は見られなかった。

表 4.9：実験群 2 で実施した授業 2 の発話記録（抜粋）

発言者	発言内容
T	予想をどうぞ。
C ₁	直列は最初に抵抗を受けたら、2 つ目は少なくなるんじゃないかなと思いました。
C ₂	2 つの抵抗と 1 つの抵抗では変わらない。
C ₃	2 つの抵抗の和が大きな 1 つの抵抗になる。
T	並列はどうなるでしょうか。
C ₄	同じになると思います。
C ₅	電流が分かれて、1 つより小さくなると思う。 (中略)
T	結果をもとに考察しましょう。
C ₆	直列は 2 つの抵抗を足した値になる。
C ₇	並列は 1 つの時よりも小さくなる。

T：教師，C_N：生徒，N：Number

表 4.10：実験群 2 生徒の授業後の感想（まとめ）

記述内容
<ul style="list-style-type: none"> ・ 式が直列と並列で違って大変。 ・ 計算や公式が多いので難しい。 ・ 抵抗を求めるのが難しい。 ・ 直列のほうはまあまあ納得できたけど、並列のほうはよく分からなかった。 ・ 図や表があれば分かった。R を使った式が分かった。 ・ 公式は分かったけど、並列の解き方が分からない。 ・ 合成抵抗の公式が分かった。これを使ってたくさん計算したい。 ・ 並列があまり理解できていない。 ・ 公式は分かったけれど、なぜその式が成り立つのかが分かっていない。

実験後の考察では「直列は 2 つの抵抗を足した値になる」や「並列は 1 つの時よりも小さくなる」と、実験結果から合成抵抗の法則を見出すことができた一方で、実験群 1 のように並列回路の合成抵抗が逆数和になることまで考察を進めた生徒は見られなかった。

実験群 2 の生徒の感想（表 4.10）では、「合成抵抗の公式が分かった」という回答が見られた一方で、「なぜその式が成り立つのかが分かっていない」や「並列のほうはよく分からなかった」と、理解できていない部分に関する記述があった。

以上の結果から、CNP 抵抗器を提示して合成抵抗を予想し、実験によって検証する授業 2 を展開することで、実験群 1 よりも効果量は小さいものの、一定程度の有効性を示すことができた。

4.1.4 検証 1 - 3

実験群 1 と実験群 2 を比較することで、授業 1 「電気抵抗の長さや幅による変化」を実施することによる効果を分析した。

実践前の学習内容（表 4.2 の 1 (1) から (3)）に対する質問紙調査の結果から、実験群 1 と実験群 2 の比較において $p = 0.084$ 、効果量 $r = 0.255$ であった。したがって、 $p > 0.05$ で有意な差は認められず、効果量は小さいため、両群の均等性を仮定した。

表 4.11 は実験群 1 と実験群 2 の質問紙調査の結果である。質問項目 2 「抵抗とは何か」 ($p = 0.006, r = 0.382$) と、3 (3) 「直列合成抵抗・納得度」 ($p < 0.001, r = 0.583$) について $p < 0.01$ で有意差が認められ、実験群 1 は実験群 2 より得点が高いことが示された。他の項目では $p > 0.05$ で有意差は認められなかった。したがって、①抵抗とは何かに対する回答、②直列合成抵抗の公式に対する納得度において、授業 1 の有効性が示された。

表 4.11：検証 1 - 3 の質問紙調査結果（マン・ホイットニーの U 検定による分析）

質問項目	<i>p</i>	<i>r</i>
2 抵抗とは何か	**0.006	0.382
3 直列合成抵抗		
(1) 公式の記述	0.327	0.137
(2) 計算問題	0.308	0.143
(3) 納得度	**0.000	0.583
4 並列合成抵抗		
(1) 公式の記述	0.161	0.196
(2) 計算問題	0.609	0.072
(3) 納得度	0.774	0.041

p* < 0.05, *p* < 0.01

4.1.5 実践 1 の考察

中学校理科「電流とその利用」単元において、CNP 抵抗器を活用した実験を取り入れた合成抵抗の新しい指導法を開発し、授業実践に基づいてその効果を分析した。

CNP 抵抗器と簡易的な電流チェッカーを活用して、現在は発展的な内容として各社の教科書に記載されている抵抗値の長さ及び幅による依存性について、実験活動を取り入れた指導が可能であることを実証した。また、合成抵抗の学習では、一般的に用いられている実験教材であるセメント抵抗器の代わりに CNP 抵抗器を用いて実験を行い、仮説を検証する授業を展開することができた。これらによって、中学校理科「電流とその利用」単元の指導に対して、新しい効果的な手法を提案することができた。

実践結果の分析から、①抵抗とは何かに対する回答、②直列合成抵抗の公式に対する納得度、③並列合成抵抗の公式の記述の 3 点において、開発した指導法の有効性が確認された。また、これらの効果は、合成抵抗の授業のみにおいて CNP 抵抗器を活用した場合も同様の傾向が見られることが示された。これにより、本指導法は既存の指導法よりも抵抗の概念形成を促し、合成抵抗の納得度や理解度を高めることが明らかとなった。

実験群 1 と実験群 2 の比較からは、①及び②に対して一定程度の効果量が得られた一方で、③に対して有意差は認められなかった。これは、合成抵抗の教材として CNP 抵抗器を活用することで並列回路の合成抵抗の理解が促進される効果は期待できるものの、抵抗値の長さや幅による依存性を扱うことが、単なる公式の記述という項目に対する効果は弱い可能性を示している。これは、開発した授業の効果がより表れやすい部分は、公式の記述のような表面的な知識ではなく、抵抗の説明や納得度などの比較的深い認知面や非認知的な面であることを示唆している。

本研究結果からは、実験群 1 と統制群、実験群 2 と統制群の比較で効果量の差は見られたが、有意差の現れる傾向は共通していた。この原因の一つに、直列の合成抵抗では授業に依

らず好成績であるため違いが表出しにくく、並列の合成抵抗では公式の記述に対する学習効果は表出し易い点が考えられる。しかし、並列合成抵抗の計算問題の正答者数が少ないことから、公式を記述できても計算操作に弱点があるために解の導出ができず、納得度の低い生徒も多く存在する可能性がある。したがって、今後は並列の合成抵抗における学習効果に関する調査をより進める必要があり、使用実験教材以外にも、簡易的な思考実験や、視覚化・イメージ形成の手法等の多様な学習指導方法の中で検討することで、合成抵抗の最適な指導方法の確立を目指した研究を進めることが重要であると考えられる。

また、笠(2000)の指摘から、並列回路は幅の和と等価であるというコンダクタンスの視覚的な捉え方が、並列回路の合成抵抗の理解に前向きな影響を及ぼした可能性があると考えられる。なお、福山(2000)の指摘と関連して、抵抗体の形状と電流の流れやすさの関係をイメージして抵抗を理解しようとする姿勢が、「抵抗とは何か」に対する理解度を高めた要因の一つである可能性も考えられる。

実践結果で記した発話内容からも、生徒が自ら仮説を立てて検証実験をすることで合成抵抗を理解する過程を推察することができた。また、実験群1及び実験群2の生徒の感想から、授業2でCNP抵抗器を使用したことで合成抵抗の理解を深めたことを確認することができた。このように、認知的な面と社会情動的な面の両面を踏まえた学習者に対するアンケート調査の結果や好意的な感想の記述が多い点は、本開発授業が認知面と社会情動面の双方に向けたアプローチと改善への取り組みとなった可能性を示唆している。

授業者の感想からは、本指導法の有効性について「並列接続の合成抵抗で、 R の逆数になるという点に気付かせる上で有効と感じた。既存の教材では逆数(反比例)の発想は出なかったと思う」、「(合成抵抗について)長さで直列を、幅で並列を説明できる点が良い」、「抵抗は幅に反比例することから、 $1/R$ を電流の流れやすさと説明することができて分かりやすいと感じた」と前向きな回答を得ることができた。授業者が指導法の有効性を実感し、生徒の実態を踏まえた手法で授業を行うことが可能である点は、本指導法の利点であり、学習効果を高める要因の一つであると考えられる。また、実験教材としてのCNP抵抗器について、「扱いやすく、幅や長さを自由に変えられる点が良い」と好意的な印象を得ることができた。したがって、今後も、各学校現場の実態に合わせて、幅広く活用されることが期待できる。

本実践によって明らかとなった効果は、CNP抵抗器の教材としてのメリットを最大限に生かした、形状依存性及び合成抵抗の授業の実施によって得ることができた。合成抵抗の実験教材としてのCNP抵抗器の活用や、新しい指導法の導入は「電流とその利用」単元のカリキュラム改革に影響を及ぼす可能性があり、今後の理科教育に対する示唆を与える可能性があると考えられる。本研究における授業の有効性の検証では、限られた期間と対象者に対する調査であるため、合成抵抗の理解に有効に作用する可能性を示唆しつつも、理解状況の詳細を把握するには至らなかった。効果の一般化に向けて、多様な教育環境の対象者を考慮した追実践や効果の質に関する詳細な分析が必要とされた。

4.2 中学校理科「電流とその利用」実践2

4.2.1 授業実践と分析方法

2020年11月、愛知県内の公立中学校第2学年の5つの学級に在籍する生徒のうち、期日に受講可能であった者182名を対象とした。授業者は4つの学級を担当するAと1つの学級を担当するBの2名である。授業者は普段の授業担当者とし、著者らは授業を行わないことで、授業者が変化することによる影響が表出しないようにする。さらに、異なる授業者が同一のワークシート（付録A, B）を用いて同一の流れで授業を展開し、授業後に質問紙調査を実施することで、授業者の違いによる効果の有無や効果量についても検討する。

中学校理科に抵抗の形状依存性を導入することによる効果を検討するために、等質な群を仮定して実践条件を制御し、質問紙調査の結果を量的に分析する。設定した条件と対象となる群（学級）を表4.12に示す。ただし、若干名の生徒数の差異を考慮した分析手法をとっている。実践1では、合成抵抗の理解に対する効果が示唆されているため、合成抵抗の実験教材を制御する条件に加えている。

合成抵抗の授業では、石川ら（2017）の課題であった合成抵抗と形状変化の関連に対して、CNPを実験教材として活用することで、具体的な操作によって生徒に明示することが可能である。

実験群1と統制群1の比較を検証2-1とする。実験群1は、抵抗の形状依存性を学習し、次時の合成抵抗の授業で実験教材にCNP抵抗器を使用する。統制群1は、抵抗の形状依存性を学習しないこと以外の条件は実験群1と一致している。両群を比較することで、抵抗の形状依存性を学習することによる効果の検証を試みる。ここで、両群の授業時間数を揃えないのは、新しい学習内容を導入することによる効果の検証に焦点化することで、今後の導入可能性について検討するためである。

表4.12：設定した群と実践の条件

群\条件	形状依存性の授業	合成抵抗の教材	授業者	生徒数
実験群1	○	CNP	A	37
統制群1	—	CNP	A	36
実験群2	○	セメント	A	37
統制群2	—	セメント	A	36
統制群3	○	CNP	B	36

※セメント：セメント抵抗器のこと。

実験群2と統制群2の比較を検証2-2とする。実験群2は、抵抗の形状依存性を学習し、次時の合成抵抗の授業で実験教材にセメント抵抗器を使用する。セメント抵抗器は教科書（有馬ら, 2018）に記載されている一般的な教材であるが、その抵抗体はセメントに包まれており、形状を目視することはできない。統制群2は抵抗の形状依存性を学習しないこと以

外の条件は実験群2と一致している。両群を比較することで、抵抗の形状依存性を学習することによる効果を、合成抵抗の実験教材にセメント抵抗器を使用した場合において検証する。

実験群1と統制群3の比較を検証2-3とする。統制群3は、授業者の違い以外の条件は実験群1と一致している。検証2-3では、検証2-1または検証2-2で表出する可能性のある、抵抗の形状依存性を学習することによる効果が、授業者の違いに依存するか検証する。

各群において授業実施前（前日の授業中）、授業実施後（翌日の授業中）、授業実施2か月後（遅延）に質問紙調査を行う。調査後は、検証1から検証3のそれぞれにおいて比較対象となる2群を抽出し、回答結果を量的に分析する。

事前テストは図4.2に示すように合計11点の電気に関する既習事項である。抵抗とは何かを説明する記述問題や、回路を流れる電流、電圧の値を求める問題、オームの法則の計算や文章表現を含む内容である。これらは、授業実施以前に学習した電気回路に関する問題であり、分析結果は各群の均等性を確認するために活用する。項目1「(電気)抵抗とは何か説明しなさい」の正答は「電流(または電気)の流れにくさ」と記述したもののみとする。評価規準や主な回答例は前節の記述や表4.3に示した通りである。

事後テストの内容を表4.13に示す(回答欄や計算用のスペースを削除している)。事前テストと共通の「抵抗とは何か」を問う項目に加えて、合成抵抗の公式の記述や計算問題、合成抵抗の公式に対する納得度、合成抵抗の考え方を応用して答える問題を設定している。遅延テストは、事後テストと同一の内容である。限られた紙面において、知識や計算技能、納得度、応用的な思考と、学習効果を多面的に検証できることを目指して質問項目を設定している。換言すれば、効果の種類に重点を置いた検証であり、それぞれの効果の詳細について本研究のみによって結論付けるのは安易である。

すべての質問紙調査は予告せずに実施する。採点は著者らが行い、その結果について2名の授業者と協議する。各検証において、比較対象となる2群の質問紙調査結果を分析する手法として、マン・ホイットニーのU検定を採用し、効果量 r を算出する。

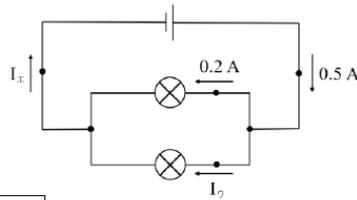
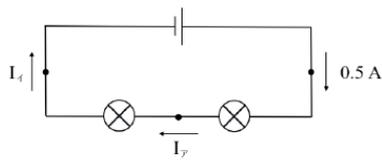
2年生理科

電流と回路 小テスト①

2年()組()番()班()

1 (電気)抵抗とは何か、説明しなさい。

2 次の回路を流れる、電流 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D の大きさを求めなさい。



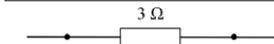
I_A	I_B	I_C	I_D
A	A	A	A

3 豆電球 a, b の並列回路で、豆電球 a に加わる電圧をはかったら、2.6 V だった。豆電球 b に加わる電圧の大きさは何 V か求めなさい。

答え V

4 抵抗が 3Ω の電熱線を用意して実験を行った。

(1) この電熱線に 2 A の電流を流すには、何 V の電圧を加えたらよいか求めなさい。



答え V

(2) この電熱線に 3 V の電圧を加えたとき、流れる電流は何 A か求めなさい。

答え A

5 次の (1) から (3) までの質問を読んで、最も適当なものを①から④までの中からそれぞれ 1 つずつ選んで○を付けなさい。

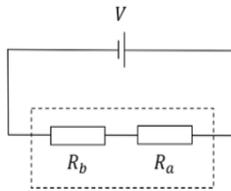
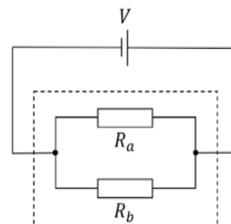
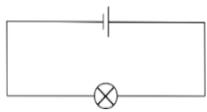
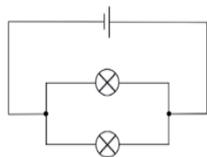
(1) 電流と電圧は ①比例する、②反比例する、③比例でも反比例でもないが関係がある、④関係ない。

(2) 電流と抵抗は ①比例する、②反比例する、③比例でも反比例でもないが関係がある、④関係ない。

(3) 電圧と抵抗は ①比例する、②反比例する、③比例でも反比例でもないが関係がある、④関係ない。

図 4.2：事前テスト

表 4.13：事後及び授業 2 か月後（遅延）に実施した質問紙調査の内容

1	（電気）抵抗とは何か，説明しなさい。	
2	抵抗の大きさが R_a と R_b の 2 個の抵抗を <u>直列</u> につないだ場合について，次の（1）から（3）までの問いに答えなさい。 （1）全体の抵抗 R を表す式を R_a と R_b を用いて書きなさい。 （2） R_a は 10Ω ， R_b は 15Ω であった。このとき，全体の抵抗を計算しなさい。 （3）（1）の式について，どれくらい納得できましたか。 最もあてはまるもの 1 つを○でかこみなさい。 全然納得できなかった あまり納得できなかった やや納得した とても納得した (1 . . . 2 . . . 3 . . . 4)	
3	抵抗の大きさが R_a と R_b の 2 個の抵抗を <u>並列</u> につないだ場合について，次の（1）から（3）までの問いに答えなさい。 （1）全体の抵抗 R を表す式を R_a と R_b を用いて書きなさい。 （2） R_a は 10Ω ， R_b は 15Ω であった。このとき，全体の抵抗を計算しなさい。 （3）（1）の式について，どれくらい納得できましたか。 最もあてはまるもの 1 つを○でかこみなさい。 全然納得できなかった あまり納得できなかった やや納得した とても納得した (1 . . . 2 . . . 3 . . . 4)	
4	同じ電源と豆電球を使用した回路アと回路イについて， 次の（1）から（2）までの問いに答えなさい。 （1）豆電球 1 個の明るさは（①アのほうが明るい， ②イのほうが明るい，③どちらも同じ）である。 適当なものを選んで○を付けなさい。 （2）回路全体の抵抗値は（①アのほうが大きい， ②イのほうが大きい，③どちらも同じ）である。 適当なものを選んで○を付けなさい。	回路ア  回路イ 

4.2.2 検証 2 - 1

表 4.14 は CNP 抵抗器を用いて合成抵抗を学習した実験群 1 と統制群 1 の質問紙調査の分析結果を示す。比較条件は抵抗の形状依存性の学習の有無である。この 2 群の事前テストの結果から有意差は認められなかった ($p = 0.165$, $r = 0.162$) ため，両群の等質性を確認した。

事後テストの結果から，合成抵抗の応用問題の正答率において，実験群 1 は統制群 1 と比較して有意に正答率が高く ($p = 0.008$, $r = 0.313$)，効果量は中程度であった。一方で，他の項目では有意な差は得られなかった。

表 4.14：検証 2 - 1：CNP 抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群の比較

質問項目	1 抵抗とは何か	2 直列回路			3 並列回路			4 応用問題	
		(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 明るさ	(2) 合成
事後 p	.306	.574	.149	.463	.150	.355	.358	.518	** .008
r	.120	.066	.169	.088	.168	.108	.123	.076	.313
遅延 p	.388	.378	.691	.748	*.010	.742	.275	.845	.568
r	.101	.103	.046	.039	.300	.039	.210	.023	.067

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

また、2 か月後の遅延テストの結果では、並列回路の合成抵抗の公式に対する正答率において、実験群 1 は統制群 1 と比較して有意に高く ($p=0.010$, $r=0.300$)、効果量は中程度であった。一方で、他の項目では有意な差は得られなかった。

したがって、CNP 抵抗器を用いて合成抵抗の学習を行った 2 群の比較において、合成抵抗の学習前に抵抗の形状依存性を学ぶことで、合成抵抗の応用問題に対する正答率が高まり、並列回路の合成抵抗の公式の正答率が保持される傾向があった。

4.2.3 検証 2 - 2

表 4.15 はセメント抵抗器を用いて合成抵抗を学習した実験群 2 と統制群 2 の質問紙調査の分析結果を示す。比較条件は検証 2 - 1 と同様に、抵抗の形状依存性の学習の有無である。この 2 群の事前テストの結果から有意差は認められなかった ($p=0.174$, $r=0.159$) ため、両群の等質性を確認した。

表 4.15：検証 2 - 2：セメント抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群の比較

質問項目	1 抵抗とは何か	2 直列回路			3 並列回路			4 応用問題	
		(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 明るさ	(2) 合成
事後 p	.162	.574	.574	.304	.972	.967	.894	.803	.297
r	.164	.066	.066	.123	.004	.005	.016	.029	.122
遅延 p	.311	.482	.972	.065	.284	*.049	.243	.943	.129
r	.118	.082	.004	.229	.125	.231	.238	.008	.178

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

事後テストの結果では、すべての項目において有意な差は得られなかった。

2 か月後の遅延テストでは、並列回路の合成抵抗の計算問題において、実験群 2 は統制群 2 と比較して有意に高い正答率 ($p=0.049$, $r=0.231$) であり、効果量は小から中程度であった。一方で、他の項目において有意な差は得られなかった。

したがって、セメント抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群の比較において、合成抵抗の学習前に CNP 抵抗器を用いて抵抗の形状依存性を学ぶことで、授業直後に差は得られなかったものの、2 か月後の合成抵抗の計算問題を解く力が保持される傾向があった。

4.2.4 検証2-3

表 4.16 は、指導者が異なる条件下で、CNP 抵抗器を用いて抵抗の形状依存性と合成抵抗を学習した実験群 1 と統制群 3 の質問紙調査の分析結果を示す。この 2 群の事前テストの結果から有意差は認められなかった ($p = 0.248$, $r = 0.134$) ため、両群の等質性を確認した。

表 4.16 に示すように、事後テスト及び遅延テストのすべての項目において、有意な差は得られなかった。したがって、本実践の範囲内においては、異なる指導者から抵抗の形状依存性を学ぶことによる効果の差は確認できないため、学習効果は授業者の違いに依存しないという結果が示された。

表 4.16：検証 2 - 3：CNP 抵抗器を用いて合成抵抗と形状依存性を学んだ 2 群の比較

質問項目	1 抵抗とは何か	2 直列回路			3 並列回路			4 応用問題		
		(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 公式	(2) 計算	(3) 納得度	(1) 明るさ	(2) 合成	
事後	p	.693	.154	—	.127	.170	.575	.119	1.000	.472
	r	.046	.166	—	.181	.160	.065	.207	0.000	.084
遅延	p	.175	.978	.417	.990	.404	.569	.732	.560	.527
	r	.159	.003	.095	.002	.098	.067	.053	.068	.074

※事後テスト 2 直列回路(2)計算では、両群とも全員正答で結果は完全に一致している。

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

4.2.5 実践2の考察

検証 2 - 1 では、CNP 抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群において、抵抗の形状依存性の授業を導入することによる効果を検証した。実践の結果、事後テストでは合成抵抗の応用問題において中程度の効果量が得られたことから、抵抗の形状依存性の授業を導入することは、合成抵抗の理解を活用して応用的に思考することに対して有益であることが示唆された。一方で、抵抗の基本的な説明や、合成抵抗の公式の記述、計算問題の正答率、合成抵抗の公式に対する納得度において有意差は得られず、基本的な理解度や学習内容に対する効果は本実践から確認されなかった。また、遅延テストでは並列回路の合成抵抗の公式の正答率において、中程度の効果量が認められたことから、並列回路の合成抵抗の知識の保持が促される可能性が示唆された。

教科書(有馬ら, 2018)の「抵抗の並列つなぎは、電熱線が太くなることと同じだと考えられる」という記述や、笠(2000)の「並列回路ではコンダクタンスの加算、直列回路では抵抗の加算と使い分けるのが便利である」という指摘のように、抵抗の形状依存性を実験から学んだ経験と合成抵抗の知識が結びつき、石川ら(2017)の課題であった合成抵抗と形状変化が関連付けられた結果、合成抵抗の理解の促進や記憶の保持につながった可能性が考えられる。

福田ら (2021) は、オームの法則の指導におけるコンダクタンスの概念の導入は、実験や実験結果の解釈には極めて有効であり、抵抗概念への変換も困難ではないと主張している。本研究では、抵抗の形状依存性を実験的・経験的に学習し、抵抗体の形状から電流の流れを視覚的に思考することで、合成抵抗の概念形成において、電流の流れやすさというコンダクタンスの考え方の導入が有効に作用した可能性がある。今後の中学校理科の指導においてコンダクタンスの考え方を導入することは、本研究の結果や先行研究の指摘を踏まえると有意義であり、検討する価値があると考えられる。

検証 2-2 では、セメント抵抗器を用いて合成抵抗を学習した 2 群において、抵抗の形状依存性の授業を導入することによる効果を検証した。実践の結果、事後テストにおいて有意差は認められなかったものの、遅延テストでは、並列回路の合成抵抗の計算問題の正答率において小から中程度の効果量が認められた。一方で、抵抗の基本的な説明や、合成抵抗の公式の記述、計算問題の正答率、合成抵抗の公式に対する納得度において有意差は得られず、基本的な理解度や学習内容に対する効果は本実践から確認されなかった。

検証 2-2 の結果は「CNP 抵抗器の代わりにセメント抵抗器を用いることで学習者の計算能力が向上する」という解釈も可能であるが、以下に記す 3 つの要因に留意する必要がある。1 点目は、有意差が認められた並列回路の計算問題は、並列回路の公式に数値を代入して計算する設問であるが、公式の記述においては有意差が得られなかった点である。本実践のねらいは抵抗の形状依存性と合成抵抗の理解の向上であり、公式に数値を代入して計算する能力のみの向上を想定していない。2 点目は、同設問における事後テストの効果量 ($r = 0.005$) は非常に小さい点である。事後テストは遅延テストよりも、授業外の要因が入り込む余地が小さいため、事後テストでほとんど差が見られなかった項目が、遅延テストでは有意差が得られたことに対して、本実践の効果だと断定することはできない。3 点目は、検証 2-1 では同設問における有意差は認められなかった点である。したがって、検証 2-2 における正答率の向上が本論文で提案した実践による学習効果を表していると結論付けるのは安易であり、本設問における有意差は予期しない要因が作用した、または偶発的な結果であるため、合成抵抗の授業で実験教材にセメント抵抗器を使用する場合、抵抗の形状依存性を導入することによる学習効果はほとんどないという可能性が考えられる。

検証 2-3 では、すべての項目において有意差は認められなかったことから、検証 2-1 や検証 2-2 で表出した抵抗の形状依存性を導入することによる効果に対して、指導者の違いによる影響は認められなかった。したがって、本実践以外の指導者が授業を実施する場合も、得られた効果が再現される可能性が期待できる。

本研究結果では、並列回路における合成抵抗の学習効果は明確に表れた。また、直列回路における効果は確認されなかったが、直列回路の理解を阻害する効果も得られなかった。沖花ら (2009) が指摘するように、合成抵抗の指導における問題点は主に並列回路において指摘されてきた。今回の質問紙調査の結果においても、直列回路に関する項目の正答率は各群とも 90 % 以上と高い値であり、本研究成果を否定するものではなかった。

質問紙調査による学習効果の量的な分析から、中学校理科に抵抗の形状依存性を導入することによる効果について、次のような知見を得ることができた。

- ①合成抵抗の授業で実験教材に CNP 抵抗器を使用する場合、並列回路における合成抵抗の理解に効果が得られる可能性は高いが、以前より理解度の高い直列回路に対する効果は得られない可能性がある。
- ②CNP 抵抗器を用いて抵抗の形状依存性を学習する場合、その後の合成抵抗の学習でセメント抵抗器を使用するよりも、CNP 抵抗器を使用するほうが、学習効果はより高まる傾向がある。
- ③本研究における抵抗の形状依存性や合成抵抗の指導において、指導者の違いによる学習効果への影響は確認できない。

これらの知見を、認知的な側面と社会情動的な側面という視点で分析すると、実践2によって表出された効果は、認知的な側面のみで、社会情動的な側面での有意差は得られなかった。ただし、合成抵抗の公式に正答した者のみを対象にして公式の納得度の差を比較しているために、認知的な側面で効果が得られなかった回答者を排除している可能性があるため、本結果のみによって社会情動的な側面における効果はないと結論付けることはできない。また、実践1においては認知的な側面と併せて社会情動的な側面における効果が得られたことも事実である。なお、安易な比較は危険であるが、実践1は全体的に実践2よりも平均得点が低い傾向が見られるため、習熟度が低い生徒に対しては社会情動的効果が得られる可能性を含めて、今後は幅広く詳細な分析が必要である。

本実践では、CNP 抵抗器を教材として活用することで、1時間の授業の中で抵抗体の形状を加工して抵抗値を測定したり、形状変化によってLEDの点灯する明るさを変化させたりする学習活動を展開することができた。本授業による効果は、CNP 抵抗器の教材としてのメリットを生かすことができたことによる寄与が大きいと考えられる。

以上により、CNP 抵抗器を活用した中学校理科における抵抗の形状依存性の導入は、抵抗や電流に対する見方を広げ、合成抵抗の理解を促すことに対して有効に作用する可能性があり、今後の学習指導要領への記載を含めた前向きな議論の推進や、更なる実践の蓄積及びそれらの結果を比較・分析することは有意義であると考えられる。

4.3 高等学校物理基礎「電気」

2019年11月に愛知県内の公立A高等学校「物理基礎」において試行的に授業を行った。対象は第2学年の生徒114名（3クラス）とし、1コマ（50分間）ずつを設定した。

図4.3は抵抗値の長さ依存性及び断面積依存性について生徒が実験した結果であり、どちらの生徒実験においても想定通りの結果を得ることができた。生徒は、実験結果に基づいて考察することで、抵抗の形状依存性について探究することができた。

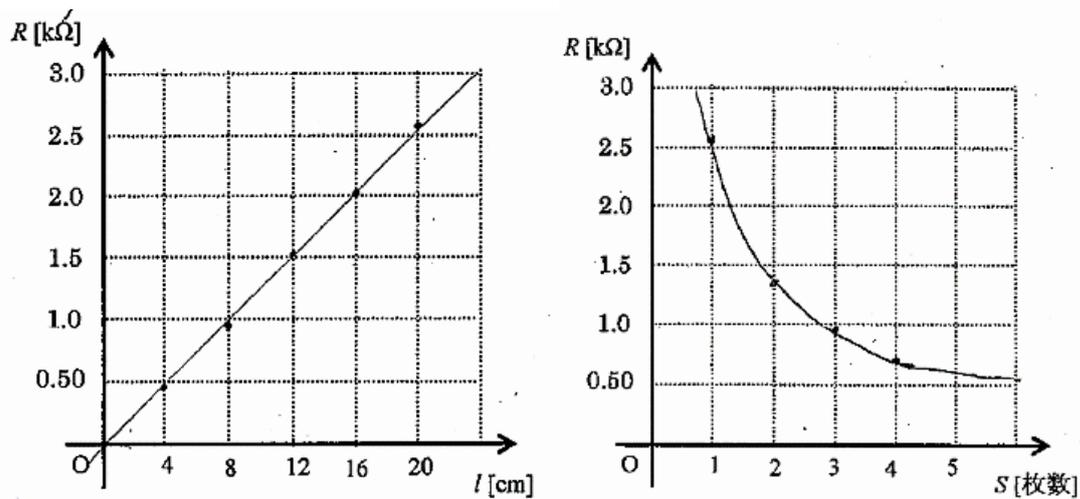


図 4.3：生徒による実験結果の記録（左：長さ依存性，右：断面積依存性）

表 4.17：実験結果の考察で電気抵抗値の形状依存性をワークシートに正しく記述できた生徒の割合（生徒数：114 名）

実験項目	人数	割合
長さ依存性	108	94.7 %
断面積依存性	112	98.2 %

表 4.18：「物理基礎」授業後アンケートの内容

質問項目
1：電気抵抗 R [Ω] を表す式を，長さ L [m]，断面積 S [m^2]，抵抗率 ρ [$\Omega \cdot m$] を用いて書いてください。
2：1 の式について，どれくらい納得できましたか。最もあてはまるもの 1 つを \bigcirc でかこんでください。 <ul style="list-style-type: none"> ・とても納得した ・やや納得した ・あまり納得できなかった ・全然納得できなかった
3：CNP の実験をした授業についての感想を自由に書いてください。

表 4.19：抵抗の形状依存性の公式の正答率（試行的授業実施 1 週間後の調査結果）

質問項目 1	人数	割合
公式の記述	102	89.5 %

表 4.17 は、ワークシートの記述から分析した、抵抗の形状依存性を実験結果から導くことができた生徒の割合を示す。抵抗値が長さに比例すると記述できた生徒は全体の 94.7%，断面積に反比例すると記述できた生徒は 98.2%であった。多くの生徒が実験結果から抵抗値の長さ依存性や断面積依存性を明らかにすることができた。

表 4.18 は、試行的授業の実施から 1 週間が経過した生徒に対して行ったアンケート調査の内容である。質問項目 1 では抵抗の形状依存性を表す公式の記述を、質問項目 2 では質問項目 1 で記述した公式に対する納得度を調査している。

質問項目 1 の集計結果（表 4.19）によると、授業の実施から 1 週間経過した後でも、89.5%の生徒は抵抗の形状依存性を表す公式を正確に記述している。また、質問項目 2 の集計結果（図 4.4）では、抵抗の形状依存性を表す公式について、96.0%の生徒が「とても納得した」または「やや納得した」と回答している。ただし、質問項目 2 の集計では、質問項目 1 で正答した 102 名の中から、無回答者 1 名を除く 101 名のみを対象としている。また、「あまり納得できなかった」と回答した生徒は 0 名である。表 4.19 や図 4.4 から、正答率や納得度は共に高い値を得ることができた。

表 4.20 は質問項目 3 における回答の抜粋である。「長いと通りづらいところが長いというイメージで考えたら分かりやすくて納得した」という記述から、CNP の形状から生じるイメージをもって納得していることが推測される。また、実験を行ったことで「印象深く分かりやすい」という回答を得ることもできた。さらに、CNP は「加工しやすい」、「自分で好きな形に切ってもっと実験したい」と、本教材の長所を的確に捉えた上で、更なる探究への意欲をもつことができた生徒もいた。

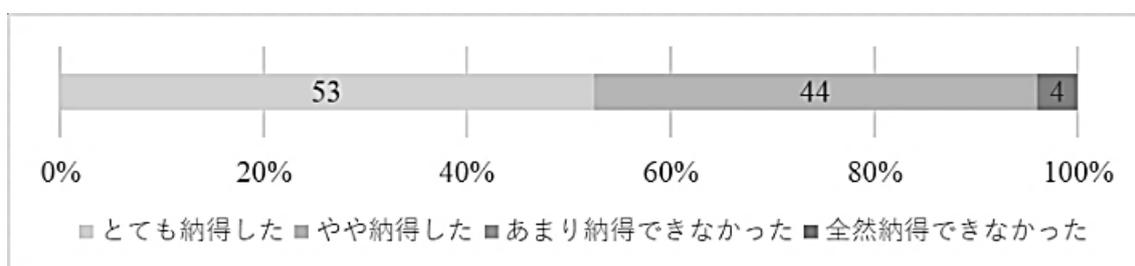


図 4.4：抵抗の形状依存性の公式の納得度（試行的授業実施 1 週間後の調査結果）

表 4.20：「物理基礎」試行的授業実施後における感想の抜粋（質問項目 3）

記述内容
<ul style="list-style-type: none"> ・長いと通りづらいところが長いというイメージで考えたら分かりやすくて納得した。 ・比例や反比例の関係になったことが面白かった。 ・実際に体験できたので、印象深く分かりやすい。 ・紙だから重ねて断面積を大きくしたり、切って小さくしたりできて加工しやすい。 ・自分で好きな形に切ってもっと実験したい。

本教材を用いた机上スケールにおける簡便な実験により、抵抗の形状依存性の定量的な再現が可能であることを確認した。また、CNP はカッターナイフやハサミ等を用いて様々な形状への加工が容易であることから、高等学校の授業時間内における生徒による実験でも安定した結果が得られることが明らかとなった。高等学校「物理基礎」における試行的授業では、生徒が主体的に実験し、抵抗値の長さ依存性や断面積依存性を探究する学習活動が展開できた。また、実験を通して CNP の形状から電流の流れをイメージできたことで、抵抗の形状依存性を表す公式の正答率や納得度において高い値を得ることができた。これらの成果は、CNP 抵抗器の教材としてのメリットを最大限に生かすことができたことによるものと考えられる。

また、認知的な面と社会情動的な面の両面を踏まえた学習者に対するアンケート調査の結果や好意的な感想の記述が多い点は、本開発授業が認知面と社会情動面の双方に向けたアプローチと改善への取り組みとなった可能性を示唆している。

4.4 高等学校理数探究

2019年11月及び12月に愛知県内の公立B高等学校第3学年「理数探究」において試行的に授業を行った。B高等学校はスーパーサイエンスハイスクール(SSH)の指定を受けており、「課題研究」の代替科目として「理数探究」を開設している。2つのグループA及びBを設定し、グループAは11月に12名の生徒を対象にして65分間、グループBは12月に13名の生徒を対象として50分間の授業を行った。

対象生徒は抵抗の形状依存性について既習であるため、検証実験として、長さや幅の異なるCNPの抵抗値をデジタルマルチメータで測定する活動を設定した。実験はペアごとに行うが、グループBは奇数であるため、補助教員1名を加えてペアを組んだ。実験結果から算出したシート抵抗を活用して、指定された抵抗値(1.0 k Ω)をもつCNP抵抗器の作製や、自分で考えた任意の形状の抵抗値を探究する活動を行った。

任意の形状の抵抗値の探究では、どの生徒も主体的に形状を設定することができた。最も多い形は台形であり、5つのペアが考案した。当初は等積の長方形と同じ抵抗値を示すと予想して探究を進めたが、測定値と一致しないことから仮説を修正し、積分計算を試みる生徒も見られた(図4.5)。このように、どのグループにおいても生徒が主体的に探究テーマを設定し、仮説と検証を繰り返す探究的な学習活動を展開することができた。

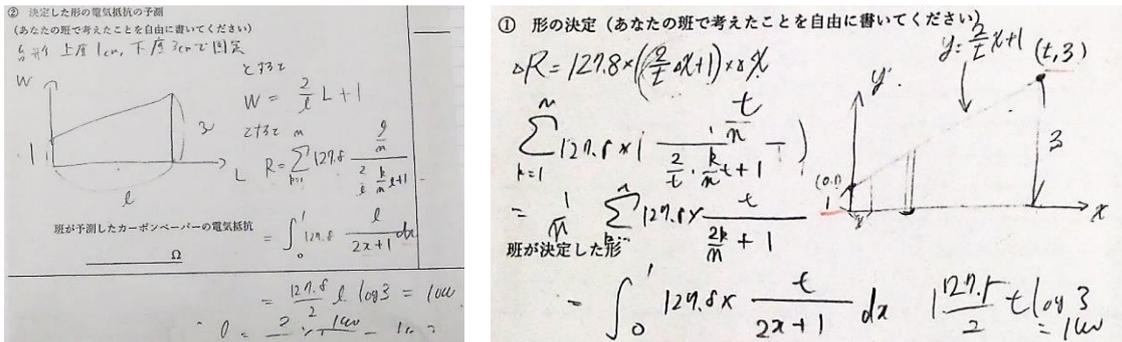


図 4.5：台形の抵抗値を積分計算によって求める生徒の記述

表 4.21：「理数探究」授業後アンケートの内容

質問項目
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や理解に変化がありましたか。
2：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考えていますか。
3：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書いてください。

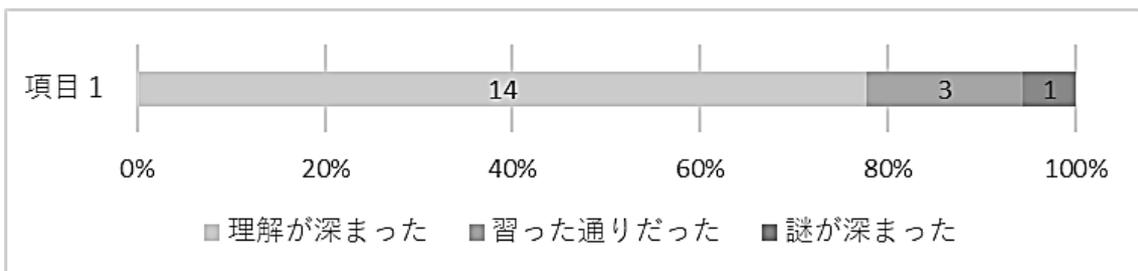


図 4.6：質問項目 1 の集計結果

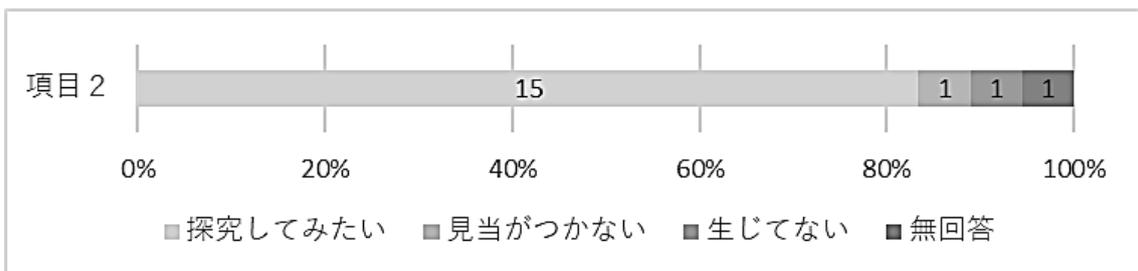


図 4.7：質問項目 2 の集計結果

授業実施後1週間以内の生徒に対して、表 4.21 に示す内容のアンケート調査を行い、18 名から回答を得た。図 4.6 は質問項目 1、図 4.7 は質問項目 2 の回答を記述内容ごとに分類し、集計した結果である。項目 1 の「理解が深まった」と回答した生徒は 14 名で、回答者全体の 78%である。その中で「実感」や「体感」と記述した生徒は 5 名、「実際」や「実物」は 3 名、「直感的に分かりやすい」は 2 名であり、多くの生徒が検証実験によって既習事項の理解を深めたことが明らかとなった。項目 2 の集計結果は「探究してみたい」と回答した生徒は 15 名で、回答者全体の 83%であった。多くの生徒が授業を通して主体的に探究する意欲をもつことができた。

項目 3 の回答からは「疑問に思ったことをすぐに実験できて楽しかった」や「自分で抵抗を作るところが面白いと感じた」と、探究活動に対する好意的な評価を得ることができた。また、「実験値が意外と理論値に近くなることに驚いた」と、探究の過程で得た感動を記す生徒もいた。

項目 1 は、「理解が深まった」という認知的な側面に強く関わる質問内容であるが、実際には、「理解が深まったかどうかをどのように認識しているか」というメタ認知的な側面も関係していると考えられる。項目 2 の探究への意欲は、情動的な側面である学びに向かう力と強く関わっている。項目 3 の回答では、学びの達成感や面白さに関わる記述が多い。これらを総合的に判断すると、本授業の実施が認知面と社会情動面の双方に向けたアプローチとなり、その成果も認知的な側面と社会情動的な側面の両方において表れたと考えられる。

高等学校「探究」における試行的授業で得られた成果は、CNP 抵抗器の加工の容易さや、再現性の高さなどの、教材としてのメリットを最大限に生かすことができたことによるものと考えられる。本教材を活用した授業を通して、抵抗の形状依存性に対する理解が深まることに加えて、生徒自らテーマを設定し、予測と検証を繰り返す探究的な学習活動が実施可能であることが明らかとなった。したがって、新設科目「理数探究」においても本教材を活用することで、探究的な学習の充実を図り、探究の過程で仮説を検証する活動が展開可能と考えられる。

第 5 章

結 論

第5章

結 論

中等理科教育の一内容である電気回路の学習過程に CNP 抵抗器教材を活用した学習活動を導入し、これによって可能となる新しい学びと、得られる学習効果について解析した。

電気抵抗の基本的な概念と、日本の中等理科教育における電気回路の学習内容や指導法の変遷について概観し、当該分野における理科教育学及び物理教育学の視点からの先行研究や全国的及び国際的な学力・学習状況検査の結果から、抵抗に関わるカリキュラムにおいては、認知的側面と社会情動的側面の双方を関連させたアプローチによる、基本的な部分から単元全体を見通した抜本的な改革が必要であることを明らかとした。

現在の中等理科教育における電気回路の学習や教材開発に関する先行研究から、既存の教材や実験指導における課題を分析し、安全性、理解度、再現性、活用性の4点にまとめた。これら4点の課題を克服するために、CNPを用いた抵抗器を中学校及び高等学校の授業で活用可能な実験教材として開発した。また、CNP抵抗器と併せて授業で活用することを想定し、CNPに流れる電流の大きさを視覚的に把握することを目的とした簡易型電流チェッカーを開発した。

CNP抵抗器及び簡易型電流チェッカーを活用して、抵抗の形状依存性や合成抵抗についての実験活動を組み込んだ、新しい学習指導法を開発した。具体的には、中等理科教育の中でも、中学校理科、高等学校物理基礎及び物理における電気回路の学習と、高等学校理数探究における活用を想定した。これにより、抵抗の形状依存性を視覚的に理解可能な指導方法を提案すると共に、抵抗そのものをテーマとした探究的な学習活動の展開を可能とした。

開発した指導法を、中学校2校と高等学校2校においてそれぞれ実践し、質問紙における学力調査、授業中に生徒が記載したワークシートの記述、授業中の様子など、質的及び量的な手法を用いて結果を総合的に記録した。

実践結果の分析では、実践結果を表すデータを量的及び質的に分析することで学習効果を解析した。その結果、生徒たちは、抵抗の形状依存性を擬似的に2次元のイメージを伴って理解し、抵抗とは何かに対する回答や合成抵抗の理解度及び納得度において有効に働く可能性が支持された。抵抗の形状依存性の理解により、抵抗の概念は固定的なものではなく、自ら変更可能なものであることを体験することができた。また、抵抗の形状依存性を合成抵抗の概念への応用させることで、電流の通り道の長さや幅という、キャリアが存在する環境に着目することができた。

電気回路のカリキュラムにおいて抵抗の概念が導入される中学校理科「電流とその利用」単元における抵抗の形状依存性をテーマとした実験を組み込んだ合成抵抗の新規学習指導法の開発を主軸として、高等学校物理及び理数探究を含めた、中等理科教育における電気回

路の学習全体の中での位置付けについて検討した。本研究によって示された、中等理科教育における電気回路のカリキュラムに CNP 抵抗器を導入することによって可能となる新しい学びとは、

- (1) 中学校理科における 2 次元的な抵抗の形状依存性の理解とこれを活用した合成抵抗の学習活動
- (2) 高等学校物理基礎または物理における 2 次元的な抵抗体を 3 次元的に拡張した抵抗の形状依存性の理解
- (3) 高等学校理数探究における微小部分の抵抗を積分することによる任意形状の抵抗を求める探究活動

である。

中等理科教育に CNP 抵抗器を導入することで可能となる新しい学びは、中学校から高等学校を通した学習過程における、抵抗に関する概念の段階的な拡張が可能となる可能性を示唆している。また、本研究は、先行研究における認知的側面と社会情動的側面の双方の課題を克服する可能性がある、両面からのアプローチによる改善に向けた取り組みであり、新しい電気回路のカリキュラムへの改革に寄与することが期待される成果を得ることができた。したがって、今後の中等理科教育における CNP 抵抗器の導入に関する積極的な議論を進めることは有意義であると考えられる。

今後の抵抗器教材における抵抗体として、紙やインク、鉛筆を含めた既存の抵抗器や、それぞれの利点を生かした多様な教材選択とそれに伴う学習活動の多様化が期待される。今後は、多様な教材やモデルの差異に着目し、中等理科教育における電気回路の学習内容に最適なカリキュラムの開発を進める予定である。また、CNP 抵抗器の利点を踏まえると、初等教育や高等教育及び社会教育での活用可能性を含めた、幅広い学習者を対象とした最適な電気回路教育についても検討可能であると考えられる。

文 献

- AgIC 社（現エレファンテック株式会社）：Circuit Marker, <https://www.agic.cc/ja/>
（最終閲覧：2022 年 2 月 27 日）。
- 愛知物理サークル，岐阜物理サークル編著（1988）：いきいき物理わくわく実験 1，新生出版。
- 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 Web ページ，
<https://subdev.ed.shizuoka.ac.jp/>（最終閲覧：2022 年 2 月 27 日）。
- 有馬朗人，ほか 62 名（2018）：理科の世界 2 年，大日本図書出版。
- Bare Conductive：Electric Paint, <https://www.bareconductive.com/collections/electric-paint>
（最終閲覧：2022 年 2 月 27 日）。
- 中央教育審議会（2021）：「令和の日本型学校教育」の構築を目指して～全ての子供たちの可能性を引き出す，個別最適な学びと，協働的な学びの実現～（答申）（中教審第 228 号），文部科学省ホームページ（最終閲覧日：2021 年 11 月 7 日）。
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/079/sonota/1412985_00002.htm
- Cohen, Jacob (1988): *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- 大日本図書（2022）：中学校理科指導に関する資料，
<https://www.dainippon-tosho.co.jp/science/curriculum.html>
（最終閲覧：2022 年 2 月 27 日）。
- 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，25(4)，182-190.
- 藤井隆，ほか 36 名（1980）：新しい科学 1 分野下，東京書籍。
- 藤井隆，ほか 38 名（1984）：改訂新しい科学 1 分野下，東京書籍。
- 深谷晃次（1997）：電流が流れる導体紙上の電位分布の測定と電位分布模型の製作，物理教育 45(2)，79-83.
- 福田恒康，遠西昭寿（2021）：「オームの法則」の指導を再考する，理科教育学研究，62(1)，331-338.
- 福山豊（2000）：オームの法則の指導について，物理教育，48(6)，538-540.
- 伏見康治，ほか 26 名（1980）：中学校理科第 1 分野下，学校図書。
- 原康夫（1988）：物理学通論 II，学術図書出版。
- 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，58(3)，319-330.
- 一条洋和，鈴木大介，遠藤健太郎，宝賀剛，佐藤淳（2016）：導電ペンを使用した電気回路演習，日本工学教育協会 H28 年度工学教育研究講演会講演論文集，126-127.

- 穂積裕一 (1997) : 東北支部 II. 生徒と共に学ぶ「電流」の授業(新学習指導要領を実践して (第 2 報), 東北支部特集), 物理教育, 45(6), 387-389.
- 池田忠寛, 松浦俊彦 (2018) : 放電記録紙を用いた可変抵抗器教材の開発, 北海道教育大学紀要 (教育科学編), 69(1), 199-204.
- 石井俊行, 柳井孝夫, 寺山桂史, 中村大輝 (2021) : 中学生の合成抵抗の学習にゲーム的要素を取り入れることの効果-理解に影響を及ぼす要因を検討して-, 科学教育研究, 45(1), 13-22.
- 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, 41(2), 221-229.
- 岩本幸恵, 猪本修 (2019) : オームの法則を理解するための電流概念の形成, 日本科学教育学会研究会研究報告, 33(7), 9-12.
- 株式会社内田洋行 : 理化学機器カタログ Vol.66 中学校,
<https://www.uchida.co.jp/education/catalog/science66jr/se0/1056.html>
(最終閲覧 : 2022 年 2 月 27 日)
- Kamata, M. and Abe, M. (2012): Hand-drawn resistors and a simple tester using a light-emitting diode, *Physics Education*, 47(6), 741-746.
- 川上綾子, 益子典文, 水野敏孝 (2003) : 理科学習における事例外挿法によるストーリーミング学習コンテンツの開発(2)-中学生を対象にしたコンテンツの利用と評価-, 日本科学教育学会研究会研究報告, 17(6), 41-46.
- 川北一彦, 恵下敏, 秋山博臣 (1992) : 小学校教員養成課程の学生の実験技能 : アルミニウム箔の電気抵抗測定について, 物理教育, 40(3), 172-175.
- 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, 44(4), 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, 45(4), 213-217.
- 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (2019) : ナノカーボンデバイス研究センター,
https://unit.aist.go.jp/cnta/ja/lh_archive/lh_190628.html (最終閲覧:2022 年 5 月 8 日).
- 国立教育政策研究所 : 教育研究情報データベース 学習指導要領の一覧,
<https://erid.nier.go.jp/guideline.html> (最終閲覧 : 2022 年 2 月 27 日) .
- 国立教育政策研究所 (2016) : OECD 生徒の学習到達度調査 2018 年調査 (PISA2018) のポイント, <https://www.nier.go.jp/kokusai/pisa/index.html> (最終閲覧 : 2022 年 5 月 8 日) .
- 国立教育政策研究所 (2021) : 国際数学・理科教育動向調査 (TIMSS2019) のポイント,
<https://www.nier.go.jp/timss/#TIMSS2015> (最終閲覧 : 2022 年 5 月 8 日) .
- 国立天文台 (2019) : 理科年表, 丸善出版.
- 國友正和, ほか 10 名 (2018) : 物理基礎, 数研出版.
- 益子典文, 川上綾子, 牛山幸彦, 水野敏孝 (2009) : 科学技術と理科学習をつなぐ事例外挿法による教材開発の方法とその効果, 日本科学教育学会研究会研究報告, 23(5), 27-32.

- 松原道男(1989):理科における学習者の知識構造のモデル化, 金沢大学教育学部教科教育研究, 25, 251-259.
- 文部科学省(2018a):中学校学習指導要領(平成29年告示)解説理科編, 学校図書.
- 文部科学省(2018b):中学校学習指導要領(平成29年告示)解説技術・家庭編, 開隆堂出版.
- 文部科学省(2019a):高等学校学習指導要領(平成30年告示)解説理科編理数編, 実教出版.
- 文部科学省(2019b):高等学校学習指導要領(平成30年告示)解説工業編, 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(2018a):H30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(2018b):H30年度全国学力・学習状況調査報告書質問紙調査.
- 村上浩二(2005):等電位線の効果的な実験方法の研究, 愛媛県総合教育センター教育研究紀要 71, 46-48.
- OECD(2015), 池迫浩子, 宮本晃司, ベネッセ教育総合研究所(訳):家庭、学校、地域社会における社会情動的スキルの育成－国際的エビデンスのまとめと日本の教育実践・研究に対する示唆－,
<https://www.oecd.org/education/cei/FosteringSocialAndEmotionalSkillsJAPANESE.pdf> (最終閲覧:2022年5月8日).
- オグボーン,J., ホワイトハウス, M. (笠耐, 西川恭治, 覧具博義監訳)(2004):アドバンシング物理, シュプリンガー・フェアラーク東京.
- 沖花彰, 谷口信一(2009):中学校電気分野における電位概念の導入と学習教材の開発, 物理教育, 57(2), 97-102.
- 大木道則, ほか 29名(1980):理科1分野下, 啓林館.
- 笠耐(2000):英国アドバンシング物理における電気回路の導入(How to teach), 物理教育, 48(6), 541-546.
- 齋藤恵介, 原田勇希, 草場実(2020):いつ, 生徒の観察・実験に対する興味の“深さ”に介入すべきか?－理科全般に対するポジティブ感情の醸成を見据えて－, 理科教育学研究, Vol.61, No.1, 107-117.
- 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学ぶ電気の基礎, 電気学会論文誌 A, 138(1), 30-35.
- 新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉(2020):電気抵抗の視覚的提示で合成抵抗の理解を促す授業の構想と実践－中学校理科「電流とその利用」単元における CNP 抵抗器の活用－, 教科開発学論集, 8, 73-82.

- Shintsuruta, M., Okubo, H., & Iwayama, T. (2021): Electrical Resistor and Capacitor Using Carbon-Based Papers for Creative Thinking to Deepen and Extend Learning, *Physics Education*, 56(3), 035006.
- 新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉 (2021) : カーボン・ナノチューブ・ペーパーを用いた電気抵抗の探究的学習, *物理教育*, 69(3), 145-150.
- 新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉 (2022a) : 電気抵抗の視覚的提示で合成抵抗の理解を促す授業の構想と実践－中学校理科「電流とその利用」単位における CNP 抵抗器の活用－, *教科開発学論集*, 10, 47-56.
- 新鶴田道也, 大久保博和, 岩山勉 (2022b) : 中学校理科における電気抵抗の形状依存性の導入に向けての検討－抵抗体の形状を 2 次元的に変化させた電気抵抗値の測定実験の評価から－, *科学教育研究*, 46(2), 117-124.
- 白畑知彦 (2015) : これからの教科教育のあり方を考える－教科開発学の視点から－, *日本教科教育学会誌*, 37(4), 93-98.
- 竹内敬人, ほか 17 名 (2012) : 化学基礎, 東京書籍.
- 戸田盛和, ほか 37 名 (1986) : 新版中学校理科 1 分野下, 大日本図書出版.
- 特種東海製紙 (2009) : トピックス「カーボンナノチューブ (CNT) ペーパーの開発に成功しました。」, <https://secure.tt-paper.co.jp/kinou/topics/20090330.html>
(最終閲覧: 2022 年 5 月 8 日) .
- 坪井忠二, ほか 32 名 (1980) : 中学校理科 1 分野下, 大日本図書出版.
- 内田洋行 (2022) : 理化学機器カタログ (中学校・高等学校版), Vol. 66, 378.
- 上西一郎, 秋吉博之 (1993) : 導体紙を用いた電気実験, *日本理科教育学会全国大会要項*, 第 43 回, 165.
- 和達清夫, ほか 22 名 (1980) : 中学理科第 1 分野下, 教育出版.
- 谷島弘仁, 新井邦二郎 (1996) : 理科の動機づけ因果モデルの検討－生物教材を通して－, *教育心理学研究*, 第 44 巻, 第 1 号, 1-10.

付録A：授業1で使用したワークシートと記入例

月 日 ()

2年生理科

抵抗の大きさは何によって決まるのだろうか

2年 組 番 _____

○電流チェッカーを使って、抵抗の大きさを決める条件を調べてみよう。

※抵抗とは 電流の流れにくさ である。(復習)

<抵抗を決める条件>

◇電流チェッカーの使い方

- ①裏側のスイッチを ON にする。
 - ②はかりたい部分の両端に直接つなぐ。
 - ③LEDの明るさやメーターをチェックする。
 - ④使い終わったらスイッチを OFF にする。
- ※忘れずに！

○デジタルテスターを使って、いろいろな形の抵抗の大きさを調べてみよう。

※デジタルテスターの使い方(教科書 P.185)

<結果>

太さ\長さ	3 cm	6 cm	9 cm			
1 cm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
2 cm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω
3 cm	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω	Ω

※裏面にグラフをかいてみよう。

<結果からわかること>

<まとめ>

☆抵抗の大きさは、長さに比例し、太さ(幅・断面積)に反比例する。

☆電流の流れやすさ： $\frac{1}{\text{抵抗}} = \frac{1}{R}$ ← 太さに比例(長さに反比例)する。

<わかったこと・感想など>

※グラフは比例(長さ と 抵抗、太さ と 抵抗の逆数)

月 日 ()

2年生理科

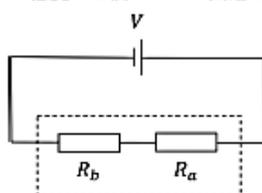
[B] 抵抗の接続

直列回路や並列回路の全体の抵抗の大きさを調べてみよう

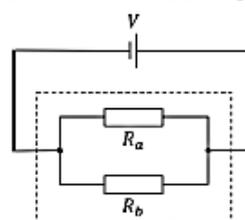
2年 組 番 _____

<予想> 同じ大きさの抵抗を2個つないだ回路では、全体の抵抗の大きさRはどのようになるのだろうか。

○抵抗の直列つなぎ



○抵抗の並列つなぎ



※デジタルテスターの使い方（教科書P.185）

<結果>

抵抗の数とつなぎ方	抵抗
1個 (Ra)	Ω
1個 (Rb)	Ω
2個直列 (R)	Ω
2個並列 (R)	Ω

<結果からわかること>

☆直列回路の全体の抵抗Rの公式

$$R = R_a + R_b$$

☆並列回路の全体の抵抗Rの公式

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b}$$

<練習問題>

①大きさが20Ωと30Ωの抵抗を直列につなぐと、回路全体の抵抗の大きさは何Ωになるか。

$$R = 20 + 30$$

$$= 50 \quad 50 \Omega$$

②大きさが20Ωと30Ωの抵抗を並列につなぐと、回路全体の抵抗の大きさは何Ωになるか。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30}$$

$$= \frac{3}{60} + \frac{2}{60}$$

$$= \frac{5}{60}$$

$$= \frac{1}{12}$$

$$R = 12 \quad 12 \Omega$$

<わかったこと・感想など>

謝 辞

本論文の執筆にあたって、愛知教育大学大学院・静岡大学大学院教育学研究科の先生方、職員の皆様には、大変お世話になった。ここに感謝の意を表す。

主指導教員の岩山勉教授には、研究テーマの設定、研究の遂行、論文の執筆に至るまで、丁寧な指導していただいた。ご指摘は常に明確な内容であり、研究の進め方を具体的に示していただいたことに加えて、研究者としての視点や必要な資質について、多くのことを教えていただいた。

副指導教員の熊倉啓之教授には、セミナーⅠ・Ⅱ・Ⅲに向けた準備や実施後において、その時の研究の進捗状況に応じた助言をいただき、研究の方向性を示していただいた。

副指導教員の稲毛正彦教授には、理科内容学における研究者としての視点や、環境教育のカリキュラム開発、新たな教科内容を構想する過程において、大変参考となる助言をいただいた。

静岡大学の郡司賀透准教授には、理科教育学の視点から研究テーマに必要な要点、研究成果に基づく論文作成の具体等、研究の遂行及びまとめ方に関して大変多くの助言をいただいた。また、博士課程の授業のみならず、適宜必要な場面での相談に対しても快く応じていただいたことに、心より感謝を申し上げる。

本研究の遂行において、実践に協力をいただいた、愛知県内2校の公立中学校、同県内2校の高等学校に在籍する職員や生徒の皆様には、貴重な機会をいただいたことで極めて重要な知見を得ることができた。誠に感謝している。

本博士課程で理科教育を専攻していた静岡大学の荒谷航平様、愛知教育大学のママチャンセン様との議論は、大変多くの視点を得る機会であり、自身の研究理論を補強するものとなった。また、研究室内の大久保博和様や大学院生、学生の皆様には、研究のサポートや助言をいただいた。ここに感謝の意を表したい。

最後に、本博士課程での研究遂行にご理解とご協力を賜った、勤務校の先生方を含む職員の皆様、応援していただいた家族に心より感謝の意を表し、結びとする。