

Development of a Teaching Program to Promote the Concept Formation of the Hall Effect in High School Physics : Through Hall Effect Experiments Using Conductive Clay

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2022-12-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 露木, 隆, 郡司, 賀透 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00029260

高等学校物理におけるホール効果の概念形成を促す授業の開発

－導電性粘土を用いたホール効果の実験を通して－

Development of a Teaching Program to Promote the Concept Formation of the Hall Effect in High School Physics

－Through Hall Effect Experiments Using Conductive Clay－

露木 隆^{1,2}, 郡司 賀透³

Takashi TSUYUKI, Yoshiyuki GUNJI

（令和 4 年 11 月 30 日受理）

ABSTRACT

In this study, we verified the validity of conductive clay as a learning material for the Hall-effect, and developed and practiced a class that encourages the formation of scientific concepts related to the Hall-effect. From the properties of the conductive clay on electric conduction, it was clarified that the conductive clay exhibits properties similar to those of semiconductor devices, and can be applied to the identification of carriers and the calculation of the number of carriers. As for the practice of the Hall-effect using conductive clay, the results of the pre-, post-, and delay surveys showed that the students were encouraged to form a scientific concept, and the formed concept was maintained even after one month. From the above results, it was found that conductive clay is a material that can be used as a learning material for Hall-effect, and that classes incorporating Hall-effect experiments using conductive clay developed in this study are effective in encouraging and maintaining scientific concepts.

1. 背景と目的

福山（2000）は、生徒たちに物理の学習項目を好きにさせ、学習する気を起こさせるには、その単元の物理概念と物理法則の、意義や意味が良くわかり、十分なイメージをつくることのできる学習の必要性を指摘している。また、豊田・小野瀬・佐藤（2016）は子どもが既存の概念を再構築しながら、学習内容を分析的に捉え、他者との議論の中で、電気分野の諸概念を拡大・修正していく理科授業は、子どもの自然の事物・現象を分析的、総合的に考察する能力を伸長するために必須であると指摘している。平成 30 年告示の学習指導要領解説理科編理数編には、物理の授業において、観察、実験に基づく探究の過程の重要性や、習得した概念や原理・法則を基に、新たな課題に関する事物・現象の結果を予測したり、解釈したりする活動の重要性について記載されており、生徒が学習する物理現象に実際に触れ、習得した知識を用いながら探究的な学習を行う中で、物理現象についての理解を深めるとともに日常生活や社会におけ

¹ 静岡県立浜松北高等学校

² 愛知教育大学大学院教育学研究科・静岡大学大学院教育学研究科共同教科開発学専攻

³ 静岡大学大学院教育学領域

る科学の有用性を実感できるような場面を設定することの必要性が強調された。

本研究の対象である「ホール効果」は、図1で示すように材料の x 方向に電流 I を流し、 z 方向から磁束密度 B の磁界を加えると、電流の構成要素である荷電粒子（キャリア）はフレミングの左手の法則に従い、電流と磁場の両方に直交する y 方向にローレンツ力を受けて加速される。これによって、試料の表面にキャリアがたまり、電流と磁場の両方に直交する方向に電場（ホール電場）が生じる。この電場は、荷電粒子に対してローレンツ力と逆向きの力を及ぼし、やがて2力が釣り合うと荷電粒子は直進するよう

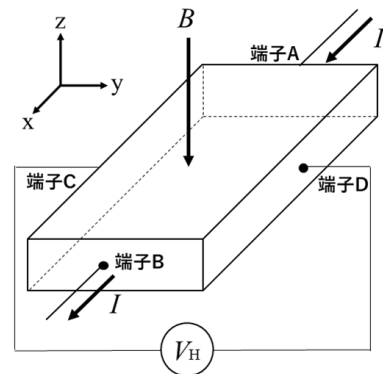


図1 ホール効果の概念図

になる。また、この電場により端子 C、D 間にホール起電力 V_H が発生する。このホール起電力を基に、材料のキャリアの種類やホール移動度、キャリア密度等の特定をすることができるため、ホール効果は材料の物性の分析に利用されている。また、ホール起電力は磁束密度に依存するため、ホール素子として磁気センサーにも応用されている。よって、ホール効果はローレンツ力や電場の概念を系統的に復習しつつ、ホール起電力の発生を単なる物理現象として捉えるのではなく、材料の物性を調査するために有効な分析手段であることを生徒に理解させ、学習内容と科学技術とを関連させながら学ぶことで、生徒に電磁気学や材料工学の分野に興味・関心を持たせ、科学者としての土台の育成に有効な教材であると考えられる。

しかし、ホール効果の実験は半導体素子を利用することが一般的であるが、実験用の半導体素子は高価であるため、高等学校の実験室にはないことも多く、実験や観察を行わず、現象の説明のみに留まることが多い。実際に私が勤務する高校にも半導体素子はなく、ホール効果の実験が行うことができない状況であった。また、ホール起電力は電子や正孔だけではなく、イオンをキャリアとして電流が流れる場合にも観測することができるが、高等学校物理の授業において、イオンを含む材料に磁場を加え、測定されたホール起電力から、キャリアとなるイオンの特定やキャリア密度の計算を行った例は見られない。そこで、本研究では Fontichiaro・Thomas (2014) によって紹介された、導電性があり身近な素材を用いて安価に製作することができる導電性粘土を用いてホール効果の概念形成を促す実践を行うこととした。しかし、この素材を用いた教科教育学論文は露木・郡司・岩山 (2022) が高校の物理基礎において導電性粘土を用いた指導プログラムが電気抵抗の形状と抵抗値に関する科学的概念の形成を促すことを明らかにしたもののみであり、導電性粘土を用いてホール効果の概念形成を行った例は見られない。また、導電性粘土の食塩の配合率と電気伝導率の関係や電気のキャリアとなるイオンの特定、ホール起電力等、素材の電気伝導の特性についても明らかになっていない。

本研究では、導電性粘土の電気伝導に関する特性を明らかにし、ホール効果学習試料としての妥当性の検証を行うとともに、導電性粘土を用いた実験を取り入れたホール効果の授業を行い、その効果の検証を行うことを目的とする。

2. 導電性粘土の材料特性

2.1 導電性粘土の製作

本研究で自作した導電性粘土は、小麦粉 75g に水 90ml、食塩 6～30g をボールに入れて小麦

粉がすべて溶け切るまでよく混ぜ、10分程度弱火にかけることで完成する。完成した導電性粘土はよく練ることで均質にすることができる。すべて身近な食材を用いて製作することができるため安価で簡単に手作りすることができる。また、食塩の配合を変えることで抵抗率や電気伝導度を変化させることが期待できる。

2.2 導電性粘土の電気伝導に関する特性

導電性粘土の抵抗値と粘土の長さや断面積、及び食塩配合率との関係を明らかにするために、5種類の食塩配合率（4.1%、7.9%、11.3%、14.5%、18.0%）の導電性粘土を断面積 194mm^2 長さ 40mm の直方体に整形し、それを直列、並列に繋ぎ、定電力装置を用いて 2.0V をかけ、そのときの電流を計測することで、抵抗値の測定を行った。なお、直列では最大5個、並列では最大6個を繋ぎ実験を行った。

図2に5種類の食塩配合率の導電性粘土について、抵抗値と長さの関係のグラフを示す。図より、導電性粘土の抵抗値は粘土の長さに比例することが分かる。また、食塩配合率が高くなるほど抵抗値は小さくなることが分かる。

図3に5種類の食塩配合率の導電性粘土について、抵抗値の逆数と断面積の関係のグラフを示す。図より、導電性粘土の抵抗値は粘土の断面積の逆数に比例することが分かる。また、食塩配合率が高くなるほど抵抗値は小さくなることが分かる。

以上の結果から、導電性粘土は半導体素子の電気抵抗と同様の傾向を示し、抵抗値を $R[\Omega]$ 、抵抗率を $\rho[\Omega\cdot\text{m}]$ 、抵抗の長さを $l[\text{m}]$ 、抵抗の断面積を $S[\text{m}^2]$ としたとき、抵抗値の公式である、

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

を実験によって導出することが可能な教材であることが分かった。

次に、食塩配合率によって導電性粘土の電気伝導率（抵抗率の逆数）がどのように変化するかについて分析するため、電気伝導率と食塩配合率との関係のグラフを作成した。図4に電気伝導率と食塩配合率との関係のグラフを示す。グラフより、食塩配合率が8.0%付近までは

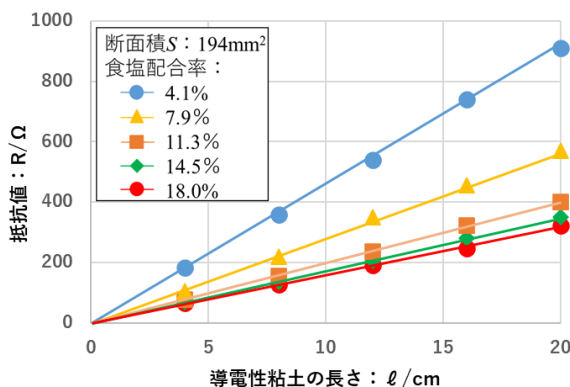


図2 導電性粘土の長さとの抵抗値の関係

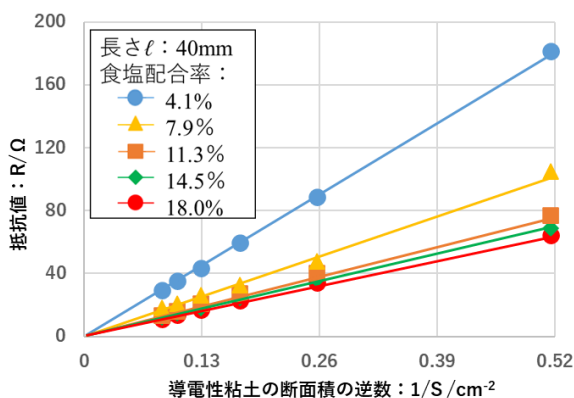


図3 導電性粘土の断面積の逆数と抵抗値の関係

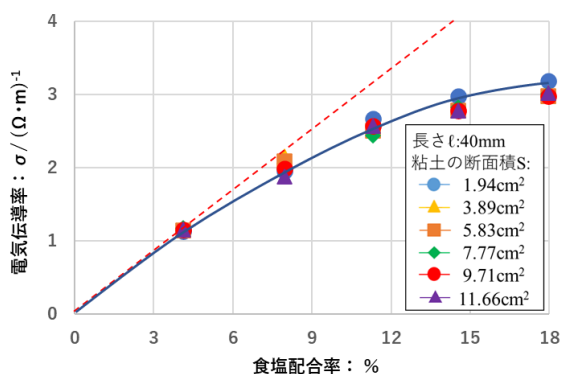


図4 食塩配合率と電気伝導率の関係

導電性粘土の電気伝導率は食塩配合率の増加に比例して大きくなる傾向を示すが、8.0%付近から変化の割合がだんだんと小さくなることから分かる。これは、食塩配合率が大きくなるほど電気のキャリアとなるイオン濃度が上昇するが、食塩配合率が8.0%程度になると導電性粘土内の食塩濃度が飽和に近づくため、粘土内のイオン濃度がほとんど変化しないからであると考えられる。なお、食塩配合率が0%の粘土についても実験を行ったところ、微電流が測定され、抵抗率はおおよそ $1.2\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ であった。これは、粘土中の水分に含まれる微量のイオンや、小麦粉中に微量に含まれるカリウムやマグネシウム等のミネラルがキャリアとなって電気が伝えられたからであると考えられる。

2.3 導電性粘土のキャリアの特定とホール効果学習試料としての妥当性の検証

導電性粘土は電気抵抗の教材として利用できることや食塩配合率と電気伝導率の関係については検証されたが、導電性粘土中の何がキャリアとして電気を伝えているのかは明らかになっていない。そこで、磁場中に置いた導電性粘土に電流を流し、ホール起電力を測定することで、導電性粘土が p 型、n 型のどちらの傾向を示すのか調べ、キャリアの正体を明らかにした。

ホール効果の実験に用いる導電性粘土の形状を統一するために、縦 48mm、幅 10mm、深さ 3mm の型を消しゴム（ポリ塩化ビニル製）で製作し、実験に用いた。また、導電性粘土に与える磁場を調整することができるよう、フェライト製磁石の間隔が3段階に調整できる架台付きマグネットを使用し、実験毎にテスラメーター (KANETEC) を用いて導電性粘土に加わる磁場の測定を行った。

図5に本研究で使用した試験片を示す。ホール起電力を測定する際、磁場の方向は導電性粘土の上面から下面方向になるように磁石を設置した。また、定電流装置 (ADCMT 6146 DC Voltage Current Source) を用いて図に示す方向に、0.50mA から 1.5mA まで 0.10mA 間隔で電流を変化させ、ホール起電力の測定を行った。なお、ホール起電力の測定には、電圧測定装置 (KEITHLEY 195A DIGITAL MULTIMETER) を用い、食塩配合率が 7.9% のもの (以後、「試料1」とする) と、14.5% のもの (以後、「試料2」とする) の2種類の導電性粘土について実験を行った。

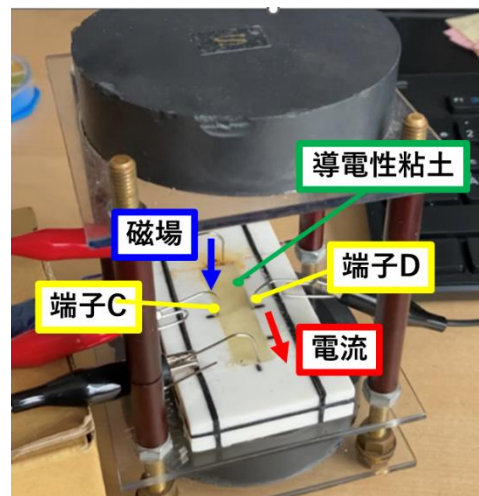


図5 ホール起電力測定実験の試験片

実験結果より、図5の端子Cの電位が端子Dの電位に比べ高くなることが確認できた。磁場は導電性粘土の上面から下面方向であり、電流は図5の矢印の方向に流れていることから、電気を伝えるキャリアは磁場からローレンツ力を受けて端子D側に集まる。よって、D側の電位が低くなったことから考えて、キャリアはマイナスの電荷であり、このことから、導電性粘土は半導体素子でいう n 型と同じ傾向を示すことが分かった。また、導電性粘土は小麦粉と水、食塩 (NaCl) のみで製作されていることから、導電性粘土の電気のキャリアは塩化物イオン Cl^- であると考えられる。

次に実験によって得られた試料1と試料2の電流とホール起電力の関係のグラフを図6、図7に示す。なお、端子Cと端子Dの電流方向の位置のずれが測定結果に影響しないよう、グラ

フに示したホール起電力 V_H は導電性粘土に磁場をかけた状態で測定されたホール起電力から、磁場がない状態で測定された電圧 (7.9%の粘土測定時 4.0~12.1mV, 14.5%の粘土測定時 6.1~18.2mV) を差し引くことで補正をした。いずれのグラフも、電流の増加に比例してホール起電力が大きくなっていることや、磁場の増加とともにホール起電力が大きくなっていることが分かる。これらの特性は一般的な半導体素子と同様の特性であり、 Cl^- にはたらくローレンツ力と電場から受ける力が釣り合うことで、 Cl^- がキャリアとなって電気を運び、導電性粘土内に電流が流れたためであると考えられる。

次に、実験結果から試料 1 と試料 2 のホール定数について、計算を行った。イオンの電荷を e 、導電性粘土内の電場を E 、イオンの速度を v 、磁場を B とすると、キャリアが電場から受ける力とローレンツ力の釣り合いより

$$eE = evB$$

であるから、

$$E = vB$$

続いて、ホール起電力を V_H 、端子 C と端子 D との間の距離を d とすると、

$$V_H = Ed = vBd$$

導電性粘土に流れる電流を I 、導電性粘土の単位体積当たりのキャリア数を n 、導電性粘土の断面積を S とすると、電流の式は、

$$I = envS$$

より、

$$v = \frac{I}{enS} \quad (2)$$

であるから、(1)式に(2)式を代入すると、ホール起電力の式は、

$$V_H = \frac{IBd}{enS}$$

となる。また、この式から散乱係数を 1 としてホール定数 R_H の式を求めると、

$$R_H = \frac{1}{ne} = \frac{SV_H}{IBd} \quad (3)$$

となる。よって、単位体積当たりのキャリア数は、

$$n = \frac{1}{R_H e} \quad (4)$$

で表される。(3)式に実験結果を代入すると、試料 1 と試料 2 のホール定数の平均値はそれぞれ

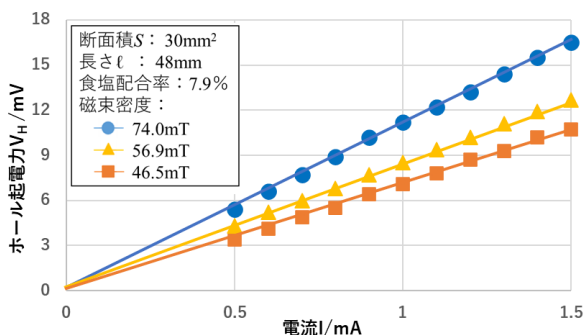


図 6 電流とホール起電力の関係 (食塩配合率 7.9%)

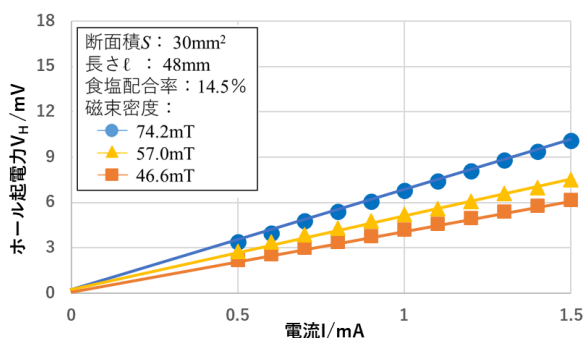


図 7 電流とホール起電力の関係 (食塩配合率 14.5%)

1.5m³/C, 0.91m³/Cであった。また、試料1と試料2のキャリア数の平均値については、求めたホール定数の平均値を(4)式を用いて、 $e=1.6 \times 10^{-19}C$ として計算すると、それぞれ $4.2 \times 10^{16}/m^3$, $6.8 \times 10^{16}/m^3$ であり、試料2のキャリア数は試料1のおよそ1.6倍であることも実験結果より求めることができた。

以上の結果から、導電性粘土を用いたホール効果の実験結果は、一般的な半導体素子のホール効果と同様の傾向を示すことが分かった。また、導電性粘土に配合する食塩の量を変化させることで、キャリア数を簡単に変えることが可能であることから、ホール効果の本来の用途である材料物性の検証を行う実験への利用が可能であると言える。また、半導体素子に比べ小麦粉や食塩といった身近で安価な材料で製作可能であることも考えると、導電性粘土はホール効果の実験への利用に妥当性のある教材であると考えられる。

3. 導電性粘土を用いたホール効果の実験の実践

3.1 調査対象

令和4年4月、高等学校3年生40人を対象に物理の授業においてローレンツ力を用いて導体や半導体のキャリアに関する特性を調べることができる方法としてホール効果の科学概念の説明を行った。そして、1ヶ月後に知識がどの程度残っているかについて調べるため、「ホール効果について説明しなさい」といった質問紙調査（以後、「事前調査」とする）を行った。しかし、概念の説明を記述できたのは40人中わずか2人だけであり、35人は「分からない」「忘れてしまった」と回答し、残りの3人はn型半導体とp型半導体の説明を記述しており、ホール効果の説明ではなかったため、不正解とした。すべての生徒がホール効果に関する講義を受け、ノートに説明を記述したにもかかわらず、95%の生徒が不正解であったことを課題として考え、ホール効果の学び直しとして導電性粘土を用いたホール効果の概念形成を促す実験を取り入れた授業を実践した。

3.2 調査方法

本研究で行った実践の概要を表1に示す。令和4年5月、40人の生徒を8班に分け、物理の授業の中でホール効果を利用した導電性粘土のキャリアの特定と、2種類の食塩配合率の導電性粘土について、キャリア数の比を求める実験を行った。

実験には2種類の食塩配合率（7.9%、14.5%）の導電性粘土を使用し、フェライト磁石を用いて磁場を加えると同時に、定電流装置を用いて1.0mAの電流を流し、ホール起電力の測定を行った。なお、磁場の測定にはテスラメーターを用いた。

ホール起電力の測定後、班で協力してホール定数を求め、2種類の導電性粘土のキャリア数の比について計算を行うとともに

表1 実践の概要

講義	電流と磁場に関する講義（50分） ・ 一様な磁場内の荷電粒子の運動及び、ホール効果の科学概念についての講義を行う。
講義の1ヶ月後	事前調査（10分） ・ ホール効果の科学概念に関する質問紙調査を行う。
事前調査の2日後	導電性粘土を用いたホール効果の実験（50分） ・ 実験の目的を確認した後、実験装置および2種類の電気伝導率の導電性粘土に関する説明を行う。 ・ 5人班で実験を行い、実験結果を実験プリントに記録させる。 ・ 各個人で得られた結果の考察を行わせ、キャリアの特定及び、キャリア密度を導出させる。 ・ 各班の実験結果と考察の結果を発表させる。 ・ ホール効果の科学概念や科学技術との関連について説明を行う。 ・ 実験の感想及び、選択式のアンケートを記入させる。
実験の2日後	事後調査（10分） ・ ホール効果の科学概念に関する質問紙調査を行う。
実験の1ヶ月後	遅延調査（10分） ・ ホール効果の科学概念に関する質問紙調査を行う。

に、導電性粘土のキャリアの特定や、その根拠について話し合い、ワークシートにまとめた。その後、各班とも実験結果について発表を行い、結果の共有を行うとともに、教師がホール効果の科学概念や科学技術との関連について改めて説明を行った。

本研究で開発した導電性粘土を用いたホール効果の実験を通して、どのくらいの生徒がホール効果に関する科学概念を獲得し、獲得した概念を維持することができたのかを検証するため、実践の2日後に事前調査と同様の事後調査を行い、実践の1ヶ月後に遅延調査を行った。

3.3 調査結果

表2に事前調査、事後調査、遅延調査においてホール効果の科学概念を記述することができた生徒の割合を示す。なお、ホール効果の説明については、「電流が流れている物体に、電流に垂直に磁場を加えると、電荷は磁場から力（ローレンツ力）を受けるため、電流と磁場とに垂直な方向に電位差（電場）が生じる」といった趣旨の内容が記述できているものを正解とした。また、ホール効果の説明として科学的に誤っているものを不正解とし、「分からない」や「忘れてしまった」については未記入とした。

表より、事前調査ではわずか5%の生徒しかホール効果の科学概念について記述できなかったが、事後調査においては90%の生徒が科学概念を記述することができたことが分かる。さらに、1ヶ月後の遅延調査においても多少減少はしたものの72.5%の生徒が獲得した科学概念を維持することができたことが分かる。

図8に生徒の事前調査、事後調査、遅延調査の記述例を示す。図より、この生徒は、4月に授業でホール効果の説明を行ってから1ヶ月後に行った事前調査ではホール効果について「忘れてました。」と回答したが、事後調査では図を用いながら科学概念を記述することができ、さらに1ヶ月後の遅延調査においても科学概念を記述することができていることが分かる。

図9に実験後の生徒の感想例を示す。感想の内容より、実験をすることでホー

表2 概念調査の結果

		事前調査	事後調査	遅延調査	
正解	科学概念	2	36	29	
	誤概念	2	1	6	
不正解		未記入	36	3	5

数字は人数(人)

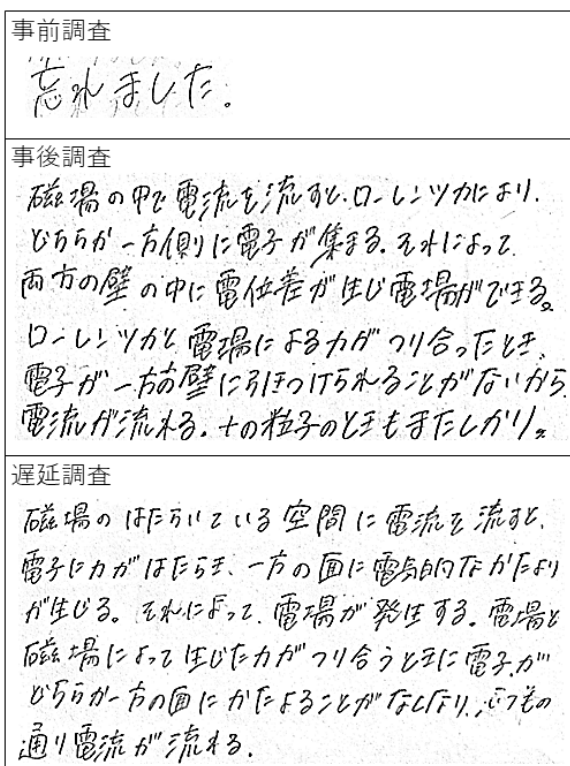


図8 概念調査の解答例

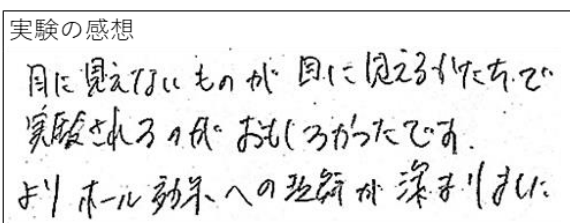


図9 実験の感想例

ル起電力や磁場等，目には見えないものを定量的に観察する中で，キャリアを特定することができ，ホール効果についての理解が深まるとともに，ホール効果への興味・関心が深まる様子を窺うことができる。他にも，「キャリアの数を求めたことで，ホール効果の意味がよく分かった」「これまで文面や絵のみで理解していて忘れがちだったが，実際に見てみて分かった」「大学やそれ以後の科学が少し見えた気がして興味深かった」といった感想も見られ，ホール効果の概念理解が進むとともに，ホール効果を学ぶことの意義や探究することの面白さを感じられた様子も窺うことができた。

実験後に行ったホール効果の概念に対する納得度についてのアンケート調査では，92.5%の生徒が肯定的な回答（納得した・やや納得した）をし，否定的な回答（やや納得できなかった・納得できなかった）は7.5%であった。よって，多くの生徒が実践を通して納得感を伴った科学概念の理解をしたことが分かる。

以上の結果から，本研究で開発した導電性粘土を用いたホール効果の実験を取り入れた授業は生徒のホール効果に関する科学概念の形成を促し，その維持にも有効であることが分かった。

4. まとめ

本研究では，最初に導電性粘土の電気伝導に関する特性を明らかにし，ホール効果学習試料としての妥当性に関する検証を行った。

5種類の食塩配合率の導電性粘土に対する抵抗値の測定結果より，導電性粘土は一般的な半導体素子の電気抵抗と同様の傾向を示す材料であることが分かった。また，ホール起電力の測定実験から，導電性粘土の電流とホール起電力の関係は一般的な半導体素子と同様の傾向を示し，キャリアの特定や，キャリア数を導出することも可能な材料であることが分かった。以上の結果から，導電性粘土はホール効果学習試料として妥当な材料であることを確認することができた。

次に，高等学校物理「ホール効果」の科学概念の形成において，導電性粘土を用いた実験を取り入れた授業を実践し，生徒のホール効果に関する科学概念の形成と，形成された概念の維持についての調査を行い，その効果の検証を行った。

事前調査の結果から，単に講義を行っただけでは1ヶ月後にはおよそ5%の生徒しかホール効果の科学概念を維持することができなかった。しかし，遅延調査の結果から，導電性粘土を用いたホール効果の実験を行い，改めてホール効果の科学概念や科学技術との関連について講義を行うと，1ヶ月後にも72.5%の生徒が科学概念を記述することができた。確かに，対象の生徒は導電性粘土を用いた実践を行ったことで，最初の講義と合わせて2度ホール効果について学習したことが概念の定着に影響した可能性は否定できない。しかし，福山（2000）が電磁気学の学習で十分な理解ができない生徒たちは，概念について適切なイメージを描くことができずにいることから，それぞれの物理量についてイメージを伴った概念として理解できるような学習と，それを確認させる新しい実験の開発の必要性を指摘していることから分かるように，実際に生徒が導電性粘土を用いたホール効果の実験を通してホール起電力を測定したり，キャリアとなるイオンの特定やキャリアの数を計算したりしたことで，電子やイオンといった目には見えないものの振る舞いについてのイメージを獲得し，それによって科学概念の形成が促されるとともに，形成された概念が維持されたのではないかと考えられる。実際に，実験後に行った物理現象に対する納得度に関するアンケートで92.5%の生徒が肯定的な回答をしているこ

とからも、実験の効果を実感する生徒が多いことが分かる。

以上の結果から、導電性粘土はホール効果学習材料として使用可能な材料であり、本研究で開発した導電性粘土を用いたホール効果の実験を取り入れた授業は、生徒のホール効果に関する科学概念の形成を促し、さらにその維持にも有効であることが分かった。

5. 今後の課題

本研究で対象とした高等学校は一校の同一学年であるため、高校生全体のデータではないことに留意する必要がある。ホール効果の科学概念形成及びその維持に有効な授業について一般化するためには、調査校を拡大する必要がある。

謝辞

本研究の実践にあたり、愛知教育大学理事・副学長岩山勉先生に多大なる協力をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 安森偉郎・岡田工・崔一煥 (2015) 「永久磁石の"片側磁極"だけを用いたホール効果」『物理教育』 63, 252-257.
- [2] 安森偉郎・岡田工・崔一煥 (2017) 「加熱治具を備え永久磁石の片側近傍において計測するホール効果装置の開発」『物理教育』 65, 77-82.
- [3] 五十嵐靖則 (1993) 「ホール効果のローレンツ力による説明：生徒の疑問に答える」『物理教育』 41, 283.
- [4] 仲野純章 (2021) 「磁界効果を利用した電気化学実験への攪拌作用導入」『理科教育学研究』 61 (3), 527-532.
- [5] 中田博保 (2017) 「高校物理に量子ホール効果の導入—前期量子論によるサイクロトロン運動の説明」『物理教育』 65, 230-233.
- [6] 沖野信一・松本伸示 (2011) 「科学の基礎概念の形成をめざした理科授業開発：高等学校「物理 I」における MIF 的素朴概念の克服のための指導法」『理科教育学研究』 52(1), 1-12.
- [7] 鈴木亨 (1998) 「ホール効果に対する疑問と高等学校教材として扱う困難」『物理教育』 46, 1-3.
- [8] 矢野淳滋 (1974) 「金属のホール効果による電子の流動速度測定」『物理教育』 21, 244-247.
- [9] 矢野淳滋 (1984) 「ローレンツ力とホール効果」『物理教育』 32, 291-295.
- [10] 矢野淳滋 (2002) 「銀鏡を使った電流と磁界の実験」『物理教育』 50, 225-227.
- [11] 湯澤正通 (2011) 「科学的概念への変化—概念変化の要因と研究の課題—」『心理学評論』 54(3), 206-217.

引用文献

- [1] Fontichiaro, K., & Thomas, A.P. (2014) 『Squishy Circuits -21st Century Skills Innovation Library: Makers As Innovators-』 Cherry Lake Pub, 8-23.
- [2] 福山豊 (2000) 「オームの法則の指導について」『物理教育』 48, 538-540.
- [3] 文部科学省 (2019) 『高等学校学習指導要領解説理科編理数編』 実教出版.

- [4] 豊田光乃・小野瀬倫也・佐藤 寛之 (2016) 「自己調整学習を志向した物理基礎における授業開発の試み」『日本教科教育学会誌』 39 (3), 13-25.
- [5] 露木隆・郡司賀透・岩山勉 (2022) 「電気抵抗に関する概念形成を促す授業の開発」『理科教育学研究』 63 (1), 127-138.
- [6] 植松恒夫他 (2016) 『改訂版 物理』 啓林館.