

小学校理科「電流がつくる磁力」における 理解度向上のための教材提案及び定量的評価

川波 蒼*・重松 宏武**

Teaching Materials Proposal and Quantitative Evaluation for Improving Comprehension
in Elementary School Science “Magnetic Force Created by Electric Currents”

KAWANAMI So*, SHIGEMATSU Hirotake**

(Received September 29, 2023)

小学校第五学年理科の単元「電流がつくる磁力」における『電磁石』に注目し、児童の電磁石の特性に関する理解度向上を目指した教材の開発及び定量的評価を行った。検定教科書に記載されているコイルを構成するエナメル線の直径条件0.3～0.6 mmを含む広範囲（直径0.1～0.8 mm）のエナメル線を用いて、磁力、温度変化並びに流れる電流値を測定し、教材に適した条件の検証を行った。磁力においては従来用いられている釘・クリップ・ワッシャーといった鉄製品が引き付けられる個数を比べることに加え、テスラメーターを用いたコイル断面（質点）における磁束密度の定量的測定を行った。さらに、乾電池の内部抵抗の影響を明らかにするために直流電源装置、アルカリ乾電池、マンガン乾電池という異なる3つの電源を用いた比較測定を行い、内部抵抗の存在そのもの並びに乾電池の劣化に伴う内部抵抗の増加がどのくらい磁力に影響を与えるかを具体的に明らかにした。得られた結果を総合的に評価することにより、乾電池1個分の起電力である1.5 Vの電圧を使用する条件下においては、直径0.5 mmのエナメル線（長さ10 m）を用いることが最も適しているという結論に至った。

はじめに

義務教育課程における磁石に関する学習は、小学校第三学年理科の単元「磁石の性質」において、磁石を身の回りの物に近付けたときの様子を観察することを通じて初めて行われる。この単元においては、磁石によって引き付けられるもの、または引き付けられないものがあることや、磁石には極性があることなど磁石の性質に関する基礎知識を身に付けるための学習を行う。また、電気に注目すると、同じく第三学年理科の単元「電気の通り道」において、電気を通すつなぎ方と通さないつなぎ方があることを学習することを通じて、電気の性質や回路に関する学習が初めて行われる。続く小学校第四学年の単元「電気の働き」においては、回路につながれた乾電池の数やつなぎ方（直列つなぎ・並列つなぎ）を変えることにより、電流の大きさや向きが変わること（豆電球の明るさやモーターの回転数が変わること）を学習する。これら第三学年及び第四学年で学習した磁石と電流に関

する発展的かつ複合的な学習として、小学校第五学年の単元「電流がつくる磁力」において電磁石について学習する。この単元では、コイルに流れる電流の大きさや向き、コイルの巻き数の違いによって磁力の大きさが変化すること、コイルには鉄芯を磁化する働きがあり、電流の向きによって極が変化することなどを学習する。これら小学校における電磁石に関する学習は、中学校理科「電流とその利用」、高等学校物理基礎「様々な物理現象とその利用」、高等学校物理「電気と磁気」へと繋がる重要な基礎を担っている。

この基礎となる小学校第五学年の電磁石の学習においては、主に教材メーカーが製作した既製品を活用し、電流の大きさの違い（乾電池1個または2個直列つなぎ）またはエナメル線の巻き数の違い（例えば、コイル100回巻と200回巻）による電磁石の磁力の変化を理解する。この学習の課題は、それぞれ2種類の比較（電池1個と2個、コイル100回巻と200回巻）による磁力の大小関係

* 日田市立高瀬小学校 ** 山口大学教育学部, 〒753-8513 山口市吉田1677-1, shigema@yamaguchi-u.ac.jp

は明確になるものの、例えば、エナメル線の巻き数を徐々に増やした場合の磁力変化の様子、具体的には、電磁石の磁力の強さが巻き数に対して直線的变化を行うのか、上または下に凸となる変化をするかなどの詳細な特徴を知ることはできないことである。そもそもそのような理解は不要もしくは時間的制約により実施不可能とも考えられるが、電磁石のコイルは条件によっては発熱する場合があることから安全面を考慮して、電流や巻き数の条件の不用意な変更を指示しなかった可能性もあると考える。

ちなみに過去の研究事例では、電磁石のコイルの巻き数と磁力の強さの関係を確かめることを目的として、乾電池を電源とした、様々な巻き数ごとの引き付けた釘の重さ測定を実施したという報告がある（井頭、2017）。ここでは、鉄芯の釘を1本ずつ増やしたときの吊り上がった釘の重さを比較して、鉄芯の釘の本数と磁力は概ね比例する結果が示されている。また、児童は巻き数を減らすことに関心を持つことが少ないことから、少ない巻き数（13, 25, 50回巻）に注目した研究報告もある（隅山 他、2014）。さらに、コイルを製作する際のエナメル線の巻き方や、コイル内の鉄芯の有無によって電磁石がつくる磁場がどのように変化するかという研究報告がある（脇島、2005）。

これら先行研究を考慮しつつ、検定教科書に記載されている条件を基本とした、児童が「電流がつくる磁力」に関する理解度向上並びに実験に積極的に取り組もうとする意識向上に繋がるために、直径や巻き数の条件を系統的に変えた時の電磁石の磁力の強さを定量的に求め、電磁石の学習時の指標となる情報を示すことを試みた。なお、児童のみならず、指導者にも有益な情報となることを心掛けた。

第1章においては、検定教科書が採用するエナメル線の直径と巻き数に関する実践の情報をまとめ、これらの結果から我々が実験に採用するエナメル線の条件（直径、巻き数、長さ）を決めた経緯を示す。続く第2章及び第3章では、我々が採用したエナメル線と常時一定電圧を印加する直流電源装置を用いて、電磁石に引き付けられるワッシャー（釘の代替物）の個数及びテスラメーター（KANETEC社製 TM-701）を用いた磁力の定量的変化の結果をそれぞれ示す。第4章においては、小学校で用いられている乾電池を電源として採用し、直流電源装置を用いた場合との結果の比較を行う。さらに第5章において、乾電池の劣化と磁力の変化に関する検討を内部抵抗の違いから検討を行う。最後の第6章まとめにおいては、第1章から第5章までに示した結果から、最も適した電磁石の実験の条件を示す。

1. 各検定教科書に掲載されているエナメル線の情報（直径、巻き数）と本研究で採用したエナメル線の条件（直径、巻き数、長さ）

現行の検定教科書（大日本図書（有馬 他、2019 検定）、東京書籍（毛利 他、2019 検定）、信州教育出版（発生川 他、2019 検定）、教育出版（養老 他、2019 検定）、学校図書（霜田 他、2019 検定）、啓林館（石浦 他、2019 検定））に記載されている電磁石のコイルに使用されているエナメル線の直径と巻き数に関する情報を表1に示す。ここで、通常の使用として設定されている条件をA、発展的学習として取り扱われている条件をBとした。なお、東京書籍は巻き数に関する情報（100回巻、200回巻）は掲載されているが、直径に関する情報が掲載されていないことから対象から除外した。

表1 検定教科書が採用するエナメル線の直径と巻き数に関する実践情報（A:通常学習、B:発展的学習）

直径 \ 巻き数	50回巻	100回巻	200回巻
0.3 mm		A教育出版	
0.4 mm	A大日本図書		
	A学校図書		
		A啓林館	
0.5 mm		A信州教育出版	
0.6 mm		B信州教育出版	

各教科書においては、同一の直径を持つ巻き数の異なる2種類（50回巻と100回巻、100回巻と200回巻）の電磁石の磁力の比較を行うが、同一巻き数における異なる直径に関する比較は行われていない。また、直径は0.3～0.6 mmという限定されたものが採用されている（発展的学習も含む）。これらは、安全性及び実験に適した磁力が保持される条件を満たす事から採用されていると推測される。

次に、コイルを構成するボビンや鉄芯の条件を決めるために、補助教材として活用されている比較的入手が容易な3社の市販教材を用いた予備実験を試みた（株式会社はくぶん、株式会社大和科学教材研究所並びに昭和教材株式会社）。それぞれの教材に関する情報（エナメル線の直径及び巻き数）を表2に示す。

表2 市販されている教材（電磁石のコイル）の情報

直径 \ 巻き数	50回巻	100回巻	200回巻
0.4 mm	株式会社はくぶん (大日本準拠)		
		株式会社大和科学 教材研究所	
		昭和教材株式会社	

株式会社はくぶんは、大日本図書向けに準拠した教材を販売しており、表1に示した大日本図書の条件（直径及び巻き数）と同一であった。また、3社共に各出版社が最も採用している直径0.4 mmのエナメル線が用いられていた。これら3社の内、エナメル線の直径や巻き数が同一だが、鉄芯の断面積が異なる株式会社大和科学教材研究所と昭和教材株式会社の2社を採用し、比較することとした（大和科学教材研究所製：実測で断面積37.9 mm²、昭和教材株式会社製：同18.9 mm²）。なお、小学校理科の学習においてはマンガン乾電池の使用が一般的に推奨されているが（本田 他、2022）、電力消費による起電力低下が著しいことから、定量的かつ再現性のある結果を得るために、代替として直流電源装置（A&D社製 AD-8723D、1.5 V設定）を、さらに、電磁石に引き付けられる対象物として付属の小釘の代わりに安全性を考慮してクリップ（約0.24 g/個）及びより軽く小さいワッシャー（約0.15 g/個）を用いた。なお、大和科学教材研究所の教材に添付されている小釘は、最も軽い約0.06 g/本（0.60 g/10本）、昭和教材株式会社の教材に添付されている小釘は、最も重い約0.44 g/本（4.38 g/10本）であった。得られた結果を表3に示す。

表3 教材を用いた検証実験の結果（引き付けたクリップの数は5回の平均値を表す）

メーカー・巻き数	検証結果	電流 (A)	クリップ (個)	ワッシャー (個)
大和科学教材研究所	100回巻	1.22	8	30
	200回巻	1.21	21	67
昭和教材株式会社	100回巻	1.27	7	21
	200回巻	1.28	19	52

両社共に100回巻きより200回巻きの方が多くのクリップまたはワッシャーが引き付けられることが確認された。クリップにおいては両社の引き付ける数の違いはほとんど無いが、ワッシャーにおいては大和科学教材研究所の方がより多く引き付けた。これは鉄芯の断面積の違い、引き付ける対象物の大きさ並びにその質量が影響していると考えられる。断面積が大きいと直接引き付けられる対象物の個数が多くなり、さらに連なって引き付けられる対象物も増えるからである。

この検証実験を踏まえて、本実験ではエナメル線の直径や巻き数を変えた系統的な実験を行うため、エナメル線は別途準備し、比較的断面積が大きい多量のボビンを準備することとした。具体的には、株式会社内田洋行社製の『ボビン・鉄芯セット 各10個組』×2セット（ボビン：直径10.0 mm×32.6 mm、鉄芯：直径7.0 mm×32.7 mm）を使用することとした。

また、引き付けられる対象物の数が多い方が、小さな

変化を正しく評価ができることから、予備実験で使用した小型かつ軽量のワッシャーを対象物として採用し、さらにより定量性を高くするためにテスラメーターを用いた鉄芯断面の磁束密度の直接測定も行うこととした。

使用するボビンが決まったことより、続いてこれに合わせてボビンに巻くエナメル線の長さの検討を行った。初期条件として、小学校で用いられている直径0.3~0.6 mm（表1）より少し幅広い条件の、直径0.1~0.8 mm（0.1 mm刻み）を検討することとし、同一抵抗下における巻き数比較を行うためにも最長の長さに設定する必要があることから、最大直径0.8 mmを基準とした。ボビンのサイズから1層に約40回巻くことができ、本実験では200回巻を上限に設定することから、5層分の長さが必要となる。そのため、ボビンの直径及びエナメル線の直径を考慮した計算式(1)を用いてそれぞれ直径が異なる200回巻きのエナメル線の全長を算出し、その抵抗値と共に図1に示す。なお、(1)式においては巻き層 n 、エナメル線の直径 $2r$ (mm) で表し、抵抗値計算においてはエナメル線の比抵抗を $1.72 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ とした。また、直径の小さいエナメル線の場合は1層に巻ける巻き数が異なるが、ここでは最大の長さを求めることが重要であることから最大長となる直径0.8 mmの時の最大巻き数（1層40回巻き）を採用した。

$$2\pi \times 40 \sum_{n=1}^5 \{5.0 + (2n - 1)r\} \quad (1)$$

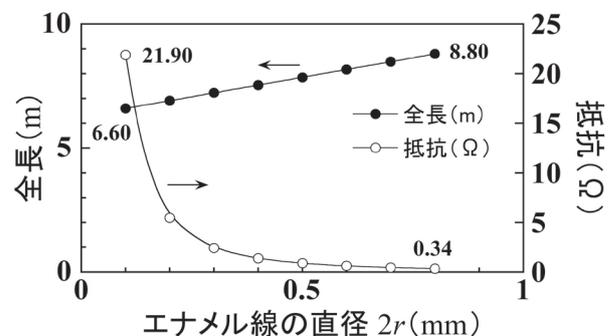


図1 (1)式により算出された各直径のエナメル線の全長 (m) 及びその抵抗値 (計算値)

計算により得られた最大の長さは直径0.8 mmの約8.80 mであるが、厳密に巻くことは困難かつ回路へと繋げる接続部分が必要であることから余裕をもって、切りの良い10 mを全長の基準として設定した。なお、すべての直径におけるエナメル線の抵抗は小さく、電源として乾電池を用いた場合、乾電池の内部抵抗（約0.2~0.3 Ω、（重松 他、2016））の影響が避けられないことがわかる。特に直径0.3 mmより太いエナメル線において顕著である（直径0.3 mm (2.43 Ω)、同0.4 mm (1.37 Ω)、同0.5 mm (0.88 Ω)、同0.6 mm (0.61 Ω)、同0.7 mm (0.45 Ω)、同0.8 mm (0.34 Ω)）。

以上をもって測定環境が決まったことより、改めてこれらの条件を用いて予備実験を行ったところ、エナメル線が直径0.3 mm未満では電池の内部抵抗の影響を大きく受け、実質的にコイルに付加される電圧は小さくなり、かつ電流も小さいことから(0.3 mmφ:0.62 A)電磁石の磁力が弱く、ワッシャーが引き付けられない、或いは個数が少なく定量性に欠けることが確認された。一方、直径が0.6 mmより大きい場合は十分な磁力が得られ、定量性については問題ないが、比較的大きな電流(0.6 mmφ:2.46 A, 0.8 mmφ:4.41 A)が流れることから発熱量が大きく、安全性の観点及び発熱によるエネルギーロスから不適切と判断した。これらのことより、巻き数変化及び直径変化の比較が容易にできるという実験目的を遂行でき、かつ安全性も保てる条件として、表1に示した各検定教科書に掲載された条件を含む直径4種(0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm)×巻き数4種(50, 100, 150, 200回巻き)の計16通りの実験を行うこととした。この選択においては、『150回巻きを追加する』こと、さらに『直径の選択肢を増やす』ことによって、同一直径下における巻き数依存性や同一巻き数下における直径依存性など様々なデータを系統的に得られることを期待した(表4)。

表4 採用したエナメル線の条件。表1示した各検定教科書に掲載された条件を含む直径4種(0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm)×巻き数4種(50, 100, 150, 200回巻き)=16通りの実験を行う。

巻き数 直径	50回巻	100回巻	150回巻	200回巻
0.3 mm	○	○ A教育出版	○	○ A教育出版
0.4 mm	○ A大日本図書 A学校図書	○ A大日本図書 A学校図書 A啓林館	○	○ A啓林館
0.5 mm	○	○ A信州教育出版	○	○ A信州教育出版
0.6 mm	○	○ B信州教育出版	○	○ B信州教育出版

2. 実験①：直流電源とさまざまな直径を持つコイルを用いた回路における引き付けられたワッシャーの個数と磁束密度の測定

表4に示した条件(エナメル線の直径及び巻き数)が異なる16種類のコイルを作製し、同一直径4種類間の巻き数の違いによる電磁石の磁力の比較、同様に同一巻き数4種類間の電磁石の磁力の比較を行うために、引き付けるワッシャーの個数の計測及びテスラメーターを用いた磁束密度の測定を行った。使用した実験機器並びに実験手順については2-1節、得られた結果を2-2節にそれぞれ示す。

2-1 使用した実験機器と実験手順(実験①)

通常のワッシャーを用いた電磁石の磁力変化に加え、電圧一定にするために直流電源装置、具体的な磁力を測定するためにテスラメーターを用いた。これら【使用した実験機器】を以下に箇条書きに示す。

【使用した実験機器】

- ・ボビン、鉄芯セット(株式会社内田洋行社製、ボビン:直径10.0 mm×32.6 mm、鉄芯:直径7.0 mm×32.7 mm)
- ・エナメル線(直径0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm)
- ・コイル巻線機(株式会社ヤガミ社製 MKH)
- ・直流電源装置(A&D社製 AD-8723D)
- ・テスラメーター(KANETEC社製 TM-701)
- ・ワッシャー(約0.15 g/個)

これらの機器を用いて以下に示す【実験手順】に従い実験を行った。なお、エナメル線をより均一的並びに密着性をもってコイルに巻くために、コイル巻線機を用いた。

【実験手順】

- I: 各直径(直径0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm)のエナメル線10 mを4本ずつ切り取った(計16本)。
- II: コイル巻線機を用いて、各直径のエナメル線について50, 100, 150, 200回巻のコイルを作製し、全長に関する条件統一のために、余ったエナメル線は切らずに束ねた。直径4種×巻き数4種の計16種のコイルを作製した。
- III: 直流電源装置及びコイルから成る回路を組んだ(図2)。ここで、直流電源装置の印加電圧は新しい乾電池1個分の起電力相当1.5 Vを採用した。
- IV: 初めに、各コイルに引き付けられるワッシャーの個数測定をそれぞれ10回行い、平均値を求めた(図3)。
- V: 次に、テスラメーターを用いて、各コイルにおける鉄心断面中央部の磁束密度を5回測定し、平均値を求めた。なお、測定面はエナメル線の巻き層の多い側を採用した。

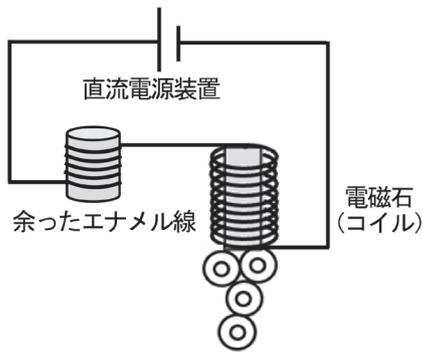


図2 直流電源装置及びコイルから成る回路の概念図

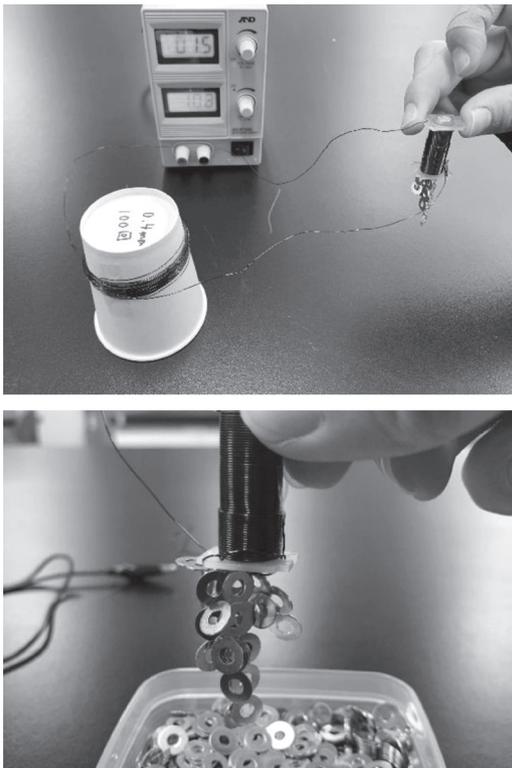


図3 電磁石を用いた実験の様子。上図：回路全体、
下図：ワッシャーが引き付けられる様子。

2-2 実験結果 (実験①)

各電磁石におけるワッシャーを用いた磁力変化測定の結果として、各電磁石が引き付けたワッシャーの個数(10回平均)とその標準偏差を表5に、各直径ごとの巻き数と引き付けたワッシャーの数との関係を図4にそれぞれ示す。なお、標準偏差を誤差として採用した。

表5 各直径・各巻き数におけるワッシャーの個数の計測値(個)(10回平均)

※表中の()内の値は、標準偏差を表す。

巻き数 直径	50回巻	100回巻	150回巻	200回巻
0.3 mm	3.1 (0.9)	6.4 (1.7)	10.9 (2.0)	20.4 (3.1)
0.4 mm	5.5 (1.9)	16.5 (2.6)	31.6 (3.8)	43.1 (3.4)
0.5 mm	10.5 (2.4)	30.4 (3.8)	47.7 (5.5)	64.1 (8.6)
0.6 mm	16.4 (2.6)	42.3 (7.5)	68.1 (10.0)	94.8 (12.6)

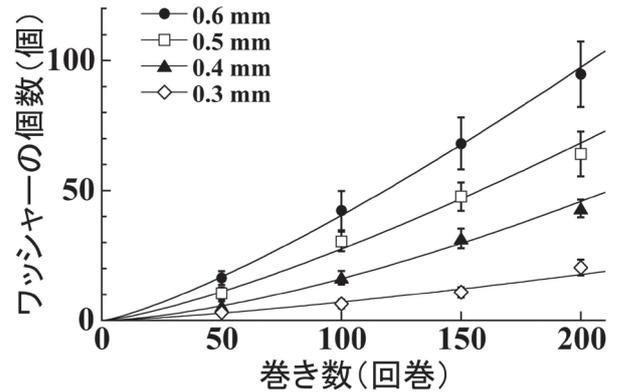


図4 各直径のコイルにおける巻き数と引き付けたワッシャーの個数の関係

図4から、同一直径のエナメル線を用いたコイルにおいては巻き数に依存してワッシャーの数が増加することが確認された。その変化は比例よりむしろ、下に凸の曲線的増加であった。また、エナメル線の直径依存については、用いたエナメル線の全長を統一したことで、直径が大きなエナメル線ほど抵抗が小さくなり(表4)、電圧一定の条件下においてはより大きな電流が流れるため、直径が大きいほど磁力は大きくなったと考えられる。

次に、各電磁石におけるテスラメーターを用いた磁束密度測定の結果(5回平均)とその標準偏差を表6に、各直径ごとの巻き数と磁束密度の関係を図5にそれぞれ示す。なお、標準偏差を誤差として採用した。

表6 各直径・各巻き数における磁束密度の測定値 (mT)
(5回平均)
※表中の()内の値は、標準偏差を表す。

直径 \ 巻き数	50回巻	100回巻	150回巻	200回巻
0.3 mm	3.24 (0.06)	6.46 (0.06)	9.34 (0.06)	12.88 (0.08)
0.4 mm	5.96 (0.06)	10.32 (0.08)	15.90 (0.10)	21.80 (0.16)
0.5 mm	9.16 (0.11)	16.00 (0.16)	24.66 (0.21)	32.82 (0.35)
0.6 mm	12.36 (0.13)	23.02 (0.19)	33.18 (0.32)	44.28 (0.50)

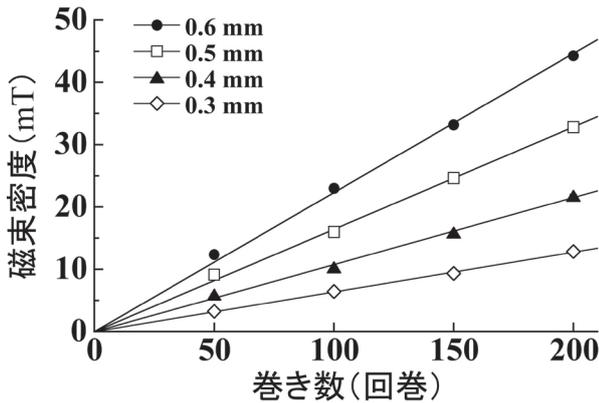


図5 各直径のコイルにおける巻き数と磁束密度の関係

図5から、同一直径のエナメル線を用いたコイルにおいては巻き数に比例して磁束密度が増加することが確認され、それぞれの傾き (mT/巻き数) は $0.056 (0.3 \text{ mm}\phi) < 0.097 (0.4 \text{ mm}\phi) < 0.153 (0.5 \text{ mm}\phi) < 0.206 (0.6 \text{ mm}\phi)$ であった。磁束密度は巻き数に比例して大きくなるという報告 (浅間, 1988) があり、実験結果からも同様の巻き数依存性が確認された。さらに誤差が小さいことから分かるように測定値の再現性が良い結果を得た。

以上の結果を踏まえ、各直径における引き付けられるワッシャーの個数 (図4) と磁束密度 (図5) を同一指標で比較するためにそれぞれ50回巻きの値を1とした換算比 (各巻き数における値/50回巻きにおける値) を図6に示す。ワッシャーの個数を破線、テスラメーターによる磁束密度の値を実線により外挿線を引いた。

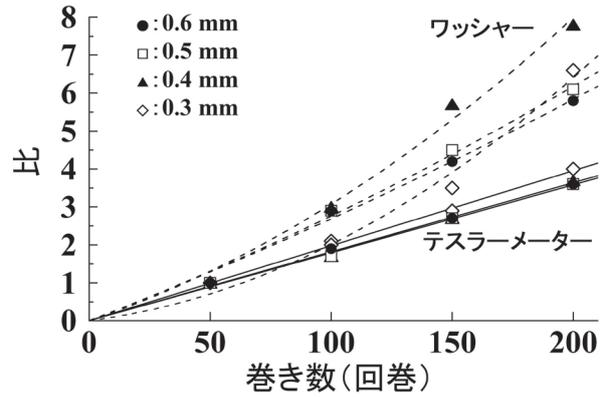


図6 各直径のコイルにおける引き付けられたワッシャーの個数と磁束密度をそれぞれ50回巻きの値を1とした換算比 (各巻き数における値/50回巻きにおける値)。マーカーが重なっているため判別しにくいですが、テスラメーターを用いた直径0.4, 0.5, 0.6 mmの結果はほぼ一致している。

このコイルをソレノイドコイルと考え、磁界の強さ H (A/m) が1 mあたりの巻き数 n (/m) と電流 I (A) の積で表されると仮定すると、

$$H = nI \tag{2}$$

の関係式を得る。なお、巻き数が大きく増えた場合は一定以上の磁力を得られないことや¹⁾、鉄心を用いたことによるさらなる磁力の増加もあり、厳密なことは言えないが、同じ直径のエナメル線は同じ抵抗値かつ同じ電流値をとることから単純に予測すると、磁界の強さは巻き数に依存し、その比は、50, 100, 150, 200回という巻き数に準じて $1 : 2 : 3 : 4 (50 : 100 : 150 : 200)$ となる。図6からは、鉄心の断面の中心点における磁束密度を測定しているテスラメーターの結果はこの比に近い値を示している (ほぼ、質点における測定と考えて良い)。一方、ワッシャーの場合は鉄心の断面積全体で複数のワッシャーを引き付け、それらワッシャーが磁化することによってさらに他のワッシャーを引き付ける構造となっており、巻き数が増え電磁石が持つ磁力が強くなるごとに、理想比 $1 : 2 : 3 : 4$ のラインからプラス側に大きくずれる結果となっている。

なお、エナメル線の直径が大きくなる程、コイルの発熱量が大きくなり、さらに単位時間当たりの温度上昇率が大きくなった。電流を流した直後は、電気エネルギーが磁力エネルギーに変換されているが、発熱によって一部が熱エネルギーへと変換され、磁力が低下していくため、長時間回路に接続し続けると、正しい測定ができなくなる可能性があり、さらに安全面への配慮が必要となる。そこで、コイルの表面温度、流れる電流及び鉄心表面の磁束密度の時間変化を測定し、これら個々の温度依存性と互いの相関性の有無を検証することを試みた。それらの結果を第3章に示す。

3. 実験②：直流電源とさまざまな直径を持つコイルを用いた回路におけるコイルの表面温度、流れる電流及び磁束密度の時間変化

電磁石は時間経過とともにコイルが発熱し、それに伴って磁力が低下する場合がある。長時間使用時の磁力低下に関する基礎データ及び発熱による安全性の検証のために、コイルの表面温度、流れる電流及び磁束密度の変化に関する測定を行った。使用した実験機器及び実験手順を3-1節に、得られた結果を3-2節にそれぞれ示す。

3-1 使用した実験機器と実験手順（実験②）

実験①の環境に加え、電磁石の表面温度変化を熱電対とデータロガーを用いて測定を行った。【使用した実験機器】を以下に箇条書きに示す。

【使用した実験機器】

- ・実験①で用いたコイル（16種）
- ・直流電源装置（A&D社製 AD-8723D）
- ・テスラメーター（KANETEC社製 TM-701）
- ・データロガー（グラフテック株式会社製 midi LOGAR GL240）
- ・表面測定用熱電対（Tタイプ）
- ・PC
- ・ポリイミドテープ（太陽株式会社製 1030-02 耐熱温度205℃）

これらの機器等を用いて以下に示す【実験手順】に従い実験を行った。

【実験手順】

- I：図7に示す概念図に従い、それぞれの計測器等を用いて回路を組んだ。その際、表面温度を正確に測定するためにポリイミドテープを用いて熱電対をコイルの表面に固定し、さらに、手振れによる測定変化を避けるためにテスラメーターの計測部がコイルの鉄芯の断面中心に位置するようにテスラメーター本体の固定を行った（図8）。
- II：直流電源装置の印加電圧は新しい乾電池1個分の起電力相当1.5Vを採用した（電圧固定）。
- III：コイルの表面温度の変化を熱電対とデータロガーを用いて1秒間隔で計測した。
- IV：同時に、直流電源装置に表示される電流値及び、テスラメーターに表示される磁束密度をそれぞれ10秒間隔で計測した。なお、長時間使用によるコイルの劣化・破損を避けるために1つのコイルにつき最大600秒（10分）に限定して行った。

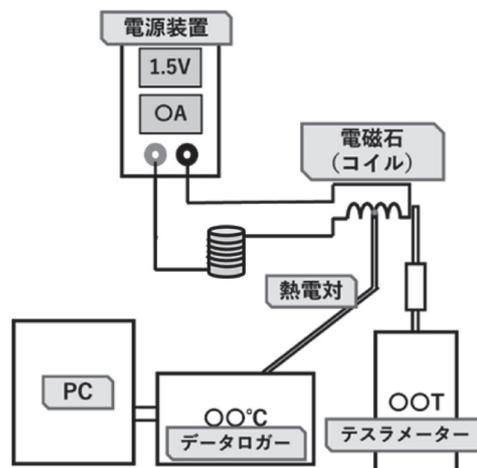


図7 コイルの表面温度、流れる電流及び磁束密度測定時の概念図

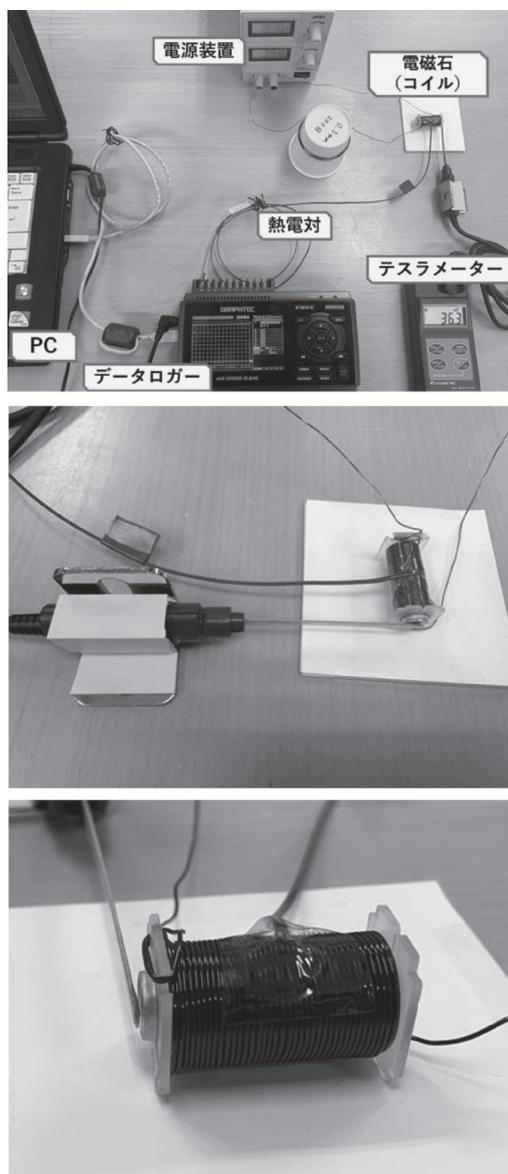


図8 コイルの表面温度、流れる電流及び磁束密度測定時の様子。上図：全体図、中図：テスラメーター及び電磁石周辺、下図：コイル周辺（左側の鉄心にテスラメーター測定部が、中央部本体には熱電対がそれぞれ固定されている）。

3-2 実験結果 (実験②)

16種のコイル (表4) における、コイルの表面温度、コイルに流れる電流並びにテスラメーターを用いた鉄心表面の磁束密度の時間変化を図9, 10, 11にそれぞれ示す。

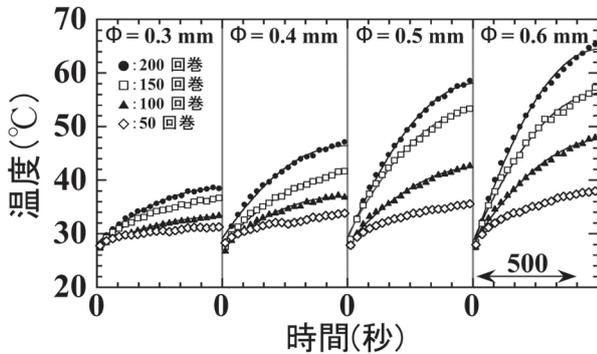


図9 各コイルにおける表面温度の時間変化。ここで横軸の1メモリは100秒を表す。

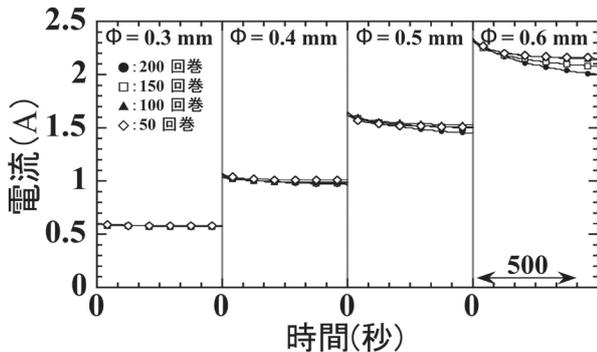


図10 各コイルに流れる電流の時間変化。それぞれ下から200, 150, 100, 50回巻の順に値をとる。なお、横軸の1メモリは100秒を表す。

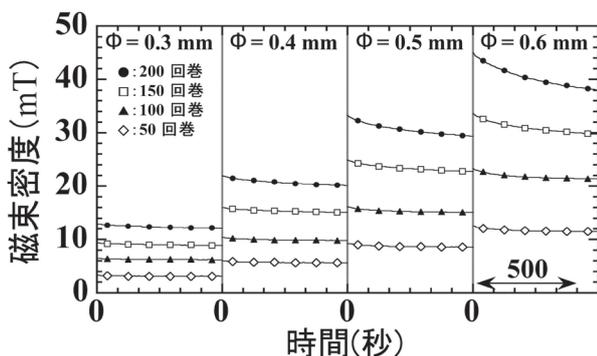


図11 各コイルの鉄心表面における磁束密度の時間変化。ここで横軸の1メモリは100秒を表す。

図9に示したように全てにおいて温度が時間とともに上昇する傾向が観測されたが、同一直径のエナメル線4種においては巻き数が多くなるにつれ、温度上昇幅が大きくなり、また同一巻き数のエナメル線4種においては直径が大きくなるにつれ、温度上昇幅が大きいが明らかとなった。この発熱に伴う電気抵抗値の上昇の影響を受け、コイルに流れる電流は温度変化の幅に相関して、減少傾向が観測された (図10)。さらに同じく、各コイルの磁束密度の減少が観測された (図11)。なお、温度変化は顕著なもの、本実験において重要な磁束密度は直径0.5と0.6 mmのそれぞれ200回巻の場合を除いて大きく変化しないことがわかる。ゆえに直流電源を用いる場合は、磁束密度の時間変化量が小さいことから、急いで測定を行う必要がないと言える。ちなみに、図5及び表6の結果と、図11の結果は各々測定したものだが、前者と時間変化を追った後者の0~40秒の範囲において数値の良い一致が確認された。これは前者が短時間接続ではあるが一定時間を要して5回繰り返し測定した時の平均値であり、後者は接続した状態での継続的時間変化を示しており、これらの条件の違いを考慮するとこれらはいずれも一致をしていると考える。

以上の結果から、温度上昇がコイルの磁束密度の低下に大きく影響が無いことが明らかとなったが、そもそも高温となる可能性がある組み合わせは安全性の面から好ましくなく、さらに実験の再現性・定量性を求めるためには一定以上の磁力が必要である。ゆえに、学校現場においてはこれら条件に該当しない直径0.3 mmと0.6 mmのエナメル線の使用は避け、直径0.4 mm及び0.5 mmのエナメル線が適しているという結論に至った。なお、これらは直流電源を用いた結論であり、教育現場においては通常、乾電池が使用されることから、さらなる検証が必要と考えた。そのため、続く第4章においては乾電池 (アルカリ乾電池、マンガン乾電池) を電源として用いた場合の結果を示す。

4. 実験③: 乾電池と直径0.4または0.5 mmのコイルを用いた回路における引き付けられたワッシャーの個数と磁束密度の変化

小学校においては直流電源を用いる機会はほとんど無く、通常、乾電池が用いられている。乾電池の種類としては安全性の観点からマンガン乾電池の使用が推奨されているものの、アルカリ乾電池などの使用も報告されている (本田 他, 2022)。そこで本章では、直流電源装置に代わりにアルカリ乾電池またはマンガン乾電池を用いた回路における測定を行い、第2章に示した直流電源を用いた結果との比較並びにアルカリ-マンガン乾電池間の比較を行う。使用する乾電池は、2種類とも未使

用(新しい)のものを用いた。なお、第2, 3章の結果から小学校における実験に好ましいと判断した直径0.4 mm, 0.5 mmのエナメル線に限定して行うこととした。

4-1 実験手順(実験③)

本章では、実験①及び②で使用した直流電源装置の代わりに、新しい単一型アルカリ乾電池またはマンガン乾電池(各1個)を電源として用いた実験を行った。異なる点として、電流及び電圧の値を測定するためにデジタルマルチメーター(MASTECH社製 MS8209)を使用し、図12に示す概念図に従って回路を組んだ。また、測定にあたって乾電池の劣化を抑えるために巻き数が少ないもの(発熱量が少ないもの)から順に測定を行った。

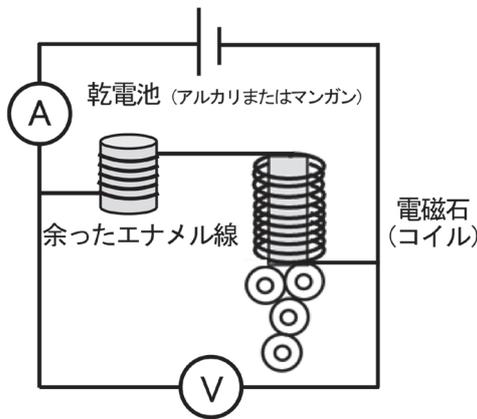


図12 乾電池を電源として、電磁石の引き付けるワッシャーの個数及び磁束密度測定時の概念図。図2との相違は電源装置の変更並びに電流計・電圧計の追加である。

4-2 実験結果(実験③)

アルカリ乾電池またはマンガン乾電池を電源とした場合の、8種類のコイル(直径2種(0.4, 0.5 mm)×巻き数4種(50, 100, 150, 200回巻き))におけるワッシャーを用いた磁力変化測定の結果として、各電磁石が引き付けたワッシャーの個数(10回平均)とその標準偏差を表7に、各コイルの巻き数と引き付けたワッシャーの個数との関係を直流電源装置を用いた場合の結果(表5)と共に図13にそれぞれ示す。なお、標準偏差を誤差として採用した。

表7 直径0.4, 0.5 mm・各巻き数におけるワッシャーの個数の計測値(個)(10回平均)
※表中の()内の値は、標準偏差を表す。

巻き数 直径		50回巻	100回巻	150回巻	200回巻
アルカリ	0.4 mm	4.8 (1.81)	14.1 (2.47)	27.3 (2.91)	37.0 (3.13)
	0.5 mm	8.4 (1.26)	22.9 (2.69)	44.0 (3.27)	61.4 (4.17)
マンガン	0.4 mm	1.1 (0.32)	5.2 (0.92)	9.9 (2.18)	17.1 (3.35)
	0.5 mm	2.7 (0.48)	8.1 (1.66)	16.9 (2.18)	24.8 (2.04)

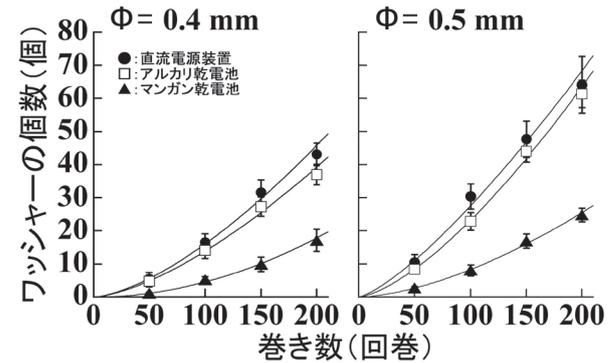


図13 各電源を用いた場合の各コイルにおける巻き数と引き付けたワッシャーの個数の関係。直流電源の結果は表5の値を採用。

図13から、電源として乾電池を使用した場合でも、引き付けたワッシャーの個数は下に凸の曲線的増加が見られた。また、電源による違いとして、いずれの巻き数においても引き付けたワッシャーの個数は、マンガン乾電池 < アルカリ乾電池 < 直流電源装置の順になった。これはアルカリ乾電池及びマンガン乾電池の内部抵抗の影響により、起電力より小さい電圧しかそれぞれのコイルに電圧がかかってなく、その差が磁力の差に影響したからである。

次に、各電池を電源として使用した場合の、8種のコイルにおけるテスラメーターを用いた磁束密度測定の結果(5回平均)とその標準偏差を表8に、各コイルの巻き数と磁束密度の関係を直流電源装置を用いた場合の結果(表6)と共に図14にそれぞれ示す。なお、図中において標準偏差を誤差として採用した。

表8 直径0.4, 0.5 mm・各巻き数における磁束密度の測定値 (mT) (5回平均)

※表中の () 内の値は、標準偏差を表す。

直径	巻き数				
	50回巻	100回巻	150回巻	200回巻	
アルカリ	0.4 mm	5.10 (0)	8.80 (0.07)	14.32 (0.05)	18.78 (0.05)
	0.5 mm	7.58 (0.08)	14.66 (0.06)	21.54 (0.06)	27.88 (0.08)
マンガン	0.4 mm	3.10 (0.07)	4.56 (0.06)	8.36 (0.09)	11.14 (0.06)
	0.5 mm	3.18 (0.05)	6.92 (0.08)	8.90 (0.07)	13.34 (0.09)

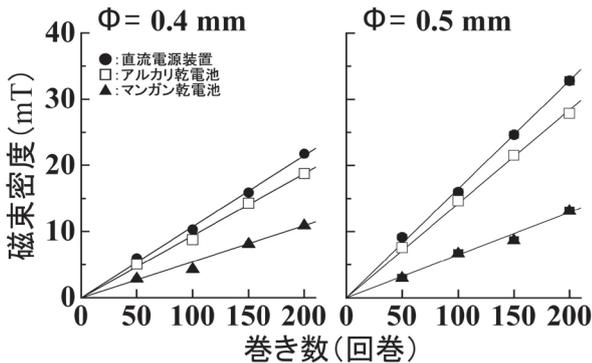


図14 各電源を用いた場合の各コイルにおける巻き数と磁束密度の関係。直流電源の結果は表6の値を採用。

図14から、電源を乾電池に変えても2-2節と同様に、巻き数に比例して磁束密度が増加することが確認された。テスラメーターを用いて磁束密度を測定した場合も、磁力の大きさは図13と同様に、マンガン乾電池 < アルカリ乾電池 < 直流電源装置の順となった。これは図13同様にそれぞれの乾電池の内部抵抗の影響である。

以上の結果から、直径0.4, 0.5 mmのコイルを用いた電磁石の特性が明らかとなった。ともに小学校理科の実験において用いるべき適切な条件(直径)と考える。ここで、改めて電磁石の使用における注意点を考えると、乾電池の利用頻度(回数・時間)に依存した磁力の低下具合が課題として挙げられる。教育現場では、本研究のように実験毎に新しい乾電池を使用することはなく、児童が個人で使用する教材ごとに複数回使用、もしくは理科室等の教室管理のものを共同で使用しているケースがほとんどである。そのため、連続使用中の実験ごとに乾電池の起電力が変化したり、使用前の起電力が異なる使用済みの乾電池を使用したりすることが日常的に起こっている。そこで、最後の検証として、乾電池の劣化具合と磁力低下の関係を明らかにする。なお、候補として直径0.4 mm及び0.5 mmが考えられるが、磁力が強い方がより定量的な評価が期待されること、また、変化の様子は2者間でそれほど差が期待されない、あったとしても図13, 14の大きさの比に即した減少のみが観測されること

が予想されることから、本測定は直径0.5 mmのコイルに限定して測定することとした。

5. 実験④：乾電池と直径0.5 mmのコイルを用いた回路における乾電池の劣化による引き付けるワッシャーの個数変化及び磁束密度変化

直径0.5 mmの4種(50, 100, 150, 200回巻)のコイルに、各々新しい乾電池を接続し、同じ測定を繰り返すことによる磁力変化(乾電池の劣化による磁力変化)を明らかにした。

5-1 実験手順(実験④)

実験③と同様な手順による磁力測定を行うとともに、使用劣化に伴った乾電池の内部抵抗の変化をLCRメーター(DER EE社製 DE-5000)を用いて直接測定を行った²⁾。具体的には、アルカリ乾電池、マンガン乾電池それぞれにおいて50, 100, 150, 200回巻を1セットとし、それぞれのセットの測定が終わるたびに(200回巻の測定終了後)内部抵抗を測定した。これを10セット(計40回)連続的に繰り返し測定することを試みた。なお、変化が無いと予想される直電源装置に関しても対比のため同様の測定を行った。

5-2 実験結果(実験④)

基準となる直流電源装置及びアルカリ乾電池、マンガン乾電池を電源とした場合の引き付けられたワッシャーの個数変化(質量から換算した値)並びにテスラメーターを用いた磁束密度の変化を図15に、各セットの200回巻の磁束密度の変化を図16にそれぞれ示す。さらに、各セットごとの乾電池の内部抵抗の値の変化(各セット測定開始時10点と最終終了後1点)を図17に示す。

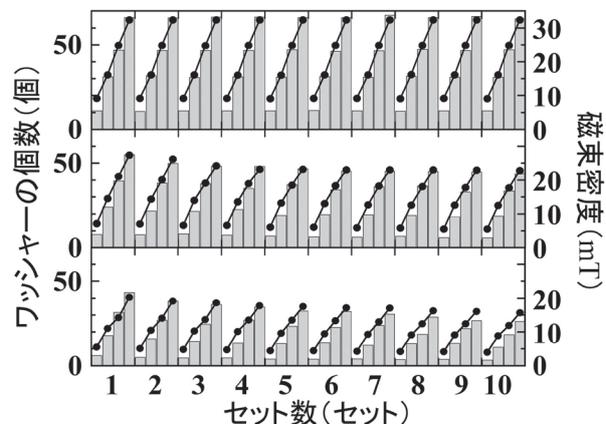


図15 直流電源装置(上段)及びアルカリ乾電池(中段)、マンガン乾電池(下段)を電源として使用した場合の引き付けたワッシャーの個数の換算値(棒グラフ)と磁束密度(折れ線グラフ)の変化

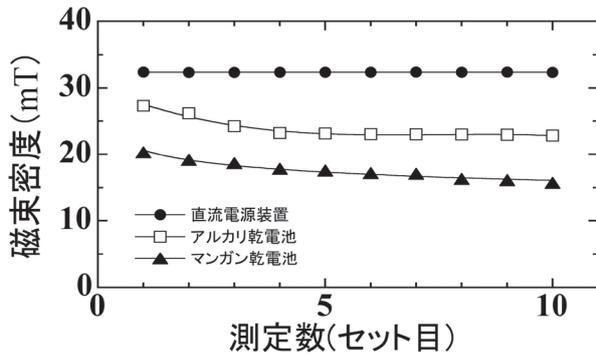


図16 各電源（直流電源装置、アルカリ乾電池、マンガン乾電池）における各セットの200回巻の磁束密度変化

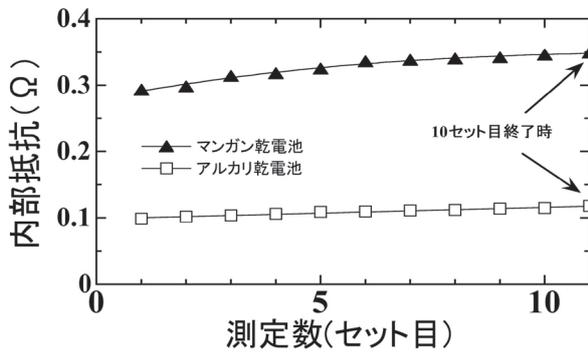


図17 各セット測定開始前及び10セット目終了時の各乾電池の内部抵抗の値 (Ω)

図15, 16から、直流電源装置、アルカリ乾電池、マンガン乾電池はそれぞれの1セット目の200回巻の強度は、1:0.84:0.63の関係であることが読み取れる。セット数が増えるにつれその値は減少し、アルカリ乾電池においては、16.4%減衰し、マンガン乾電池は22.7%減衰することが明らかとなった。これは、乾電池の内部抵抗の結果(図17)からもアルカリ乾電池よりマンガン乾電池の方が電力を消費するとともに、内部抵抗の値が大きく増加しているからである(アルカリ乾電池は0.099 Ωから0.118 Ω、マンガン乾電池は0.293 Ωから0.349 Ωへと変化)。そもそも乾電池の内部抵抗の初期値が異なり、この大小関係が図13, 14に示す磁力の関係(マンガン乾電池 < アルカリ乾電池 < 直流電源装置)に影響を及ぼしたことがわかる。

これらの結果から、マンガン乾電池よりも減衰率が小さいアルカリ乾電池を電源として用いた方が、電力低下のない直流電源装置に近い結果が得られることが期待される。ゆえに教育現場においては、マンガン乾電池よりもむしろアルカリ乾電池の使用を検討することが好ましいという結果を得た。

6. まとめ

児童の電磁石の特性に関する理解度向上を目指し、エナメル線の直径0.1~0.8 mmの広範囲を候補に挙げ、実験を通じて最適な条件の検証を行った。第一条件として、目的を遂行するだけの磁力を持ち、さらに発熱量が少ない0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mmを候補に残し、直径4種(0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mm) × 巻き数4種(50, 100, 150, 200回巻き)の計16種類の電磁石における表面温度、流れる電流並びに磁束密度変化を測定した。これら多角的な評価により、直径0.4 mmまたは0.5 mmがより適した条件であるという結論に至った。最終判断として採用した起電力1.5 Vの乾電池を用いた回路における磁力評価は、直径0.5 mmの方がより多くのワッシャーを引きつけたことから、直径0.5 mmのエナメル線を用いるのが最適であると結論付けた。しかし、図9に示すように通電時間によっては発熱量が大きくなり、安全性が損なわれる恐れがあるためであることから、使用する巻き数は200回巻を除いた50, 100, 150回巻を使用することを推奨する。

また、コイルを構成するエナメル線の抵抗は小さいことから(図1)、乾電池の内部抵抗の影響が避けられないという課題が挙げられた。乾電池の劣化による磁力減衰の結果から、マンガン乾電池よりもアルカリ乾電池の方が磁力の減衰率は小さく(図16)、直流電源装置を用いた場合に相当する磁力が保たれた。そのため、ショート回路の危険性が回避されるのであればアルカリ乾電池の方が電源としてより適していることが明らかとなった。従来通り、マンガン乾電池を使用するのであれば、使用時間が経つにつれ、連続的に磁力が減衰することを考慮して通電時間を極力短くする等、注意して取り扱う必要がある。

本研究においては電磁石の磁力の定量化を図るためテスラメーターを用いたが、児童にとって、表示される数値は視覚的に理解しやすい情報ではないため、概念理解は困難であることが予測される。しかし、発展的な取り扱いとして、電磁石全体の磁力として引き付けたワッシャーの個数の評価とは異なり、コイルの鉄芯表面の一点における磁力を測定しているということ、さらに巻き数による強度の変化の様子の違いは概念として理解できるのではないかと推測する。そこで、テスラメーターを用いた定量的理解のための磁束密度の測定と、ワッシャーを引き付けるという視覚的理解の容易な実験を組み合わせるにより深い学びへと繋がることを期待する。このような、定量的かつ視覚的な実験を併用することを通じて、児童の「電流がつくる磁力」に関する理解度向上並びに実験に積極的に取り組もうとする意識向上に繋がることを期待する。

参考文献

- 浅間一成 (1988) 「電磁石の強さの測定及び磁界観察教具の製作」新潟県立教育センター研究報告 98, pp. 29-36.
- 有馬朗人 他 文部科学省検定済教科書 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『たのしい理科 5年』大日本図書株式会社.
- 井頭均 (2017) 「電磁石に関する一研究」教育学論究 9-1, pp. 13-18.
- 石浦章一 他 文部科学省検定済教科書 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『わくわく理科 5』株式会社新興出版社啓林館.
- 癸生川武次 他 文部科学省検定済教科書 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『楽しい理科 5年』一般社団法人信州教育出版社.
- 重松宏武・兼安真也・吉村大介 (2016) 「小中学校理科・高等学校物理における「電池の内部抵抗」の取り扱い I - 並列に接続した豆電球の明るさはどうなるのか -」山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要 42, pp. 79-88.
- 霜田光一 他 文部科学省検定済教科書 教師用指導書 朱書編 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『みんなと学ぶ 小学校理科 5年』学校図書株式会社.
- 隅山裕志・安藤彩・碧南市教育研修会理科部会 (2014) 「B03 小学校第5学年「電磁石の性質」に関する教材研究」日本理科教育学会東海支部大会 研究発表要旨集 60, p. 19.
- 本田泰基・重松宏武 (2022) 「小中学校理科における電池のショート回路の危険性 - 実験中に起こりうるショート回路の危険性に関する定量的評価 -」山口大学教育学部研究論叢 71, pp. 229-237.
- 毛利衛 他 文部科学省検定済教科書 教師用教科書 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『新しい理科 5』東京書籍株式会社.
- 養老孟司 他 文部科学省検定済教科書 令和2年度小学校理科用 (2019検定) 『未来をひらく 小学理科 5』教育出版株式会社.
- 脇島修 (2005) 「電磁石の強さの考察」大阪と科学教育 19, pp. 3-6.
- 電池内部抵抗測定アダプター』, <http://ja7vra.blogspot.com/2014/11/de-5000.html> (参照2023年9月1日).

注

- 1) 富山県総合教育センター科学情報部 理科教育室, “デジタル理科室へようこそ! 『電磁石を製作するときの基礎知識』, <https://www.digirika.tym.ed.jp/materials/denjisyakukisotisiki/> (参照2023年9月1日).
- 2) ジャンクな電子工作&徒然落書き帳『DE-5000 充電