

電磁石の理解を深めるためのモールス電信機の試作

自然科学系教育サブプログラム 21AF404

古矢 善人

【指導教員】 大向 隆三 松岡 圭介 近藤 一史

【キーワード】 理科の有用性 電磁石 モールス電信機

1. はじめに

小学校理科指導要領¹⁾ではTIMSS調査(2015)の結果を踏まえ、教育内容の見直しとして日常生活や他教科と関わる活動の充実などによって理科の面白さや理科の有用性を認識できるようにすることが挙げられている。また、全国学力・学習状況調査報告書²⁾では電流の向きの問題において、学習したことを実際の回路に適用することを苦手とする傾向が見られている。これは、知識と実際の回路が結びついておらず、日常生活とのつながりが不明瞭なためだと考えられる。さらに、同調査報告書³⁾では磁石・電磁石の性質を捉えることに課題が見られ、性質を理解することの重要性が示されている。これらの課題を解決するために、電磁石を用いた教材を開発できれば日常生活との結びつきや性質の理解につなげることができると考えられる。電磁石の単元では、「①コイルに鉄芯を入れて電流を流すと鉄芯が電磁石になること」と「②電流の向きを変えると電磁石の極が入れ替わること」、「③電磁石の強さはコイルの巻き数や電流の大きさで変わること」の3点を理解することが求められている。⁴⁾また、電磁石の日常での利用例としてモーターが挙げられることが多いが、モーターの電磁石は半回転毎に極性が反転するため、小学生には原理が難しい。そこで、電磁石のコイルに電流が流れている間だけコイル中の鉄芯が電磁石になる性質を活用したモールス電信機を例として授業で示すことが有効だと考えられる。モールス電信機とは、1838年にアメリカで発明された通信機器で、電気を用いて情報を伝える最初の通信技術である。日本では1854年に日米和親条約を結ぶために来日したペリーによって贈呈され、1997年には国の重要文化財に指定された。(図1)



図1 エンボッシング・モールス電信機⁵⁾

モールス電信機の回路はスイッチと電源、コイルの3つがあれば動作するので小学生でも十分に原理を理解でき、通信技術の歴史に触れることで日常生活ともつながる。以上より、理科の授業で実用可能なモールス電信機の教材を試作することは理科の有用性や面白さの認識に有効な手段だと考

えられる。本研究では理科の授業で実用可能なモールス電信機の試作・評価を目的に研究を行った。

2. モールス電信機の原理、試作方針

2-1. モールス電信機の原理

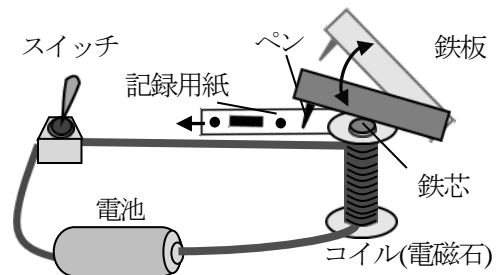


図2 モールス電信機の実験配置

実験配置は図2の通りである。ここでは回路の原理を示すために図1にある記録用紙を送るための車輪の機構は省略している。スイッチを動かして回路に電流を流すことで電磁石のコイルが磁場を生じ、磁化された鉄芯が鉄板を引き寄せる。鉄板にはペンがついており、鉄芯に鉄板が引き寄せられてペンが記録用紙に触れる。スイッチを切り替えて電流を止めると鉄板は電磁石から離れ、ペンも記録用紙から離れる。よって、記録用紙を一定速度で動かしながらスイッチを切り替えることで電流を流した時間に応じて記録用紙に点や線が記録される。記録された点や線文字に対応させることで受信者は情報を受け取ることができる。また、スイッチとコイルの間の導線を長くすることで送信者と受信者が遠く離れた場所においてもモールス信号で情報伝達ができる。

2-2. モールス電信機の試作の方針

本研究では小学校理科の実験を目指して以下の3つの段階でモールス電信機の試作を行った。

① 電磁石の特性評価

教材として使用することを想定しているため、材料の入手が容易であることや安定して動作すること、安全面での配慮がなされていることなどが重要となる。そこで、装置の材料の検討、コイルの作る磁場の安定化、実験の際の安全性などを多角的に検討した。

② 単純な装置の作製

最初はできるだけ単純な装置構成でうまく動作するモールス電信機を作りたいので、まずは短い導線で装置を作り、その動作を確かめた。

③ 実用に向けたモールス電信機の教材化

②の結果を発展させ、実際に児童が離れた位置で情報のやりとりができるように装置を改良した。この装置を使用するのは教室を想定し、廊下から教室内など直接目の届かない10 m 程の距離で通信できる装置を試作した。

3. 電磁石の特性評価

3-1. 装置の材料の検討

小学校での使用を想定しているため、小学校理科の教材として市販されている電磁石のセット(100回巻、200回巻、300回巻のコイルと鉄芯)、市販の電池と電池ケース、ワニ口クリップとリード線、トグルスイッチといった入手しやすい部品を用いて回路を構成した(図3)。次項にあるようにコイルの磁場の安定化を図るなどして、必要に応じて装置の材料は変更、追加することとした。

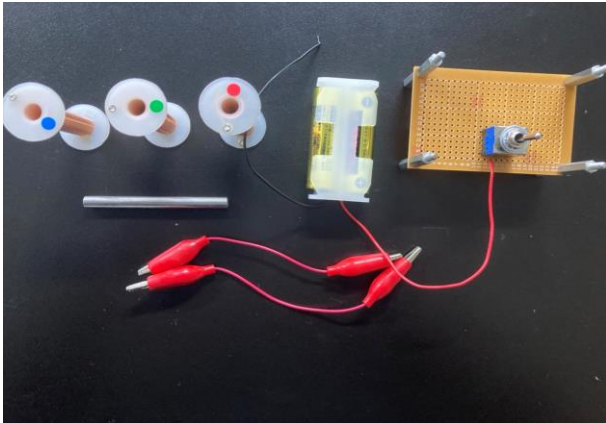


図3 回路の構成材料

3-2. コイルの作る磁場の安定化

記録用紙にペンで点や線を描くには、電磁石が鉄板を引き寄せる力の大きさが十分大きくなっている必要がある。鉄板が引き寄せられる力の大きさは電磁石の作る磁場の大きさと関係があるはずである。そこで、磁場の強さと鉄板にはたらく力の大きさの関係を調べた。



図4 磁場の大きさと力の関係の実験配置

電磁石はソレノイドコイルが作る磁場によって鉄芯を磁化しているため、磁場の強さ(H [A/m])は1 mあたりの導線の巻き数(n [回/m])とコイルを流れる電流の強さ(I [A])を用いて、

$$H = nI$$

で表すことができる。そこで、磁場の強さに影響を与える n と I の条件を変えて、 H と鉄板にはたらく力の大きさ(F [N])の関係を明らかにした。力の大きさの測定は図3の材料に加えて図4のスタンドとばねはかりを使用した。スタンドに固定したばねはかりの先端にテープで釘を固定し、スイッチを操作して乾電池から電磁石に電流を流す。電磁石に釘が付いた状態(図4左)からスタンドのアームを上方向に動かし、ばねはかりで釘を引っ張り上げる。釘が電磁石から離れた瞬間(図4右)にばねはかりが指していた値を力の大きさ(F)と読み取り、電磁石が釘を引っ張っていた力とした。

① 電流の強さによる鉄板を引く力の大きさの変化

図2の回路は電池とスイッチ、コイルのみで構成されているため、オームの法則より電池の電圧(V [V])、導線抵抗と電池の内部抵抗の合成抵抗(R [Ω])とすれば

$$V = RI$$

となる。よって、電流値を変化させるためには電池を1本から5本まで増やしながら、電圧を変化させればよい。そこで、単3乾電池を5本とデジタル電流計を用意し、図4の実験配置の回路部分を図5のようにして、ばねはかりの値を読んだ。

図5の電源部分は単3電池を直列に接続し、電池が1本の時から5本の時まで1本ずつ本数を変えてデータを記録した。結果は図6に示す。

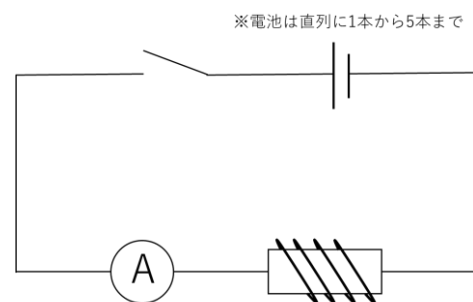


図5 電流の強さと力の大きさの実験回路

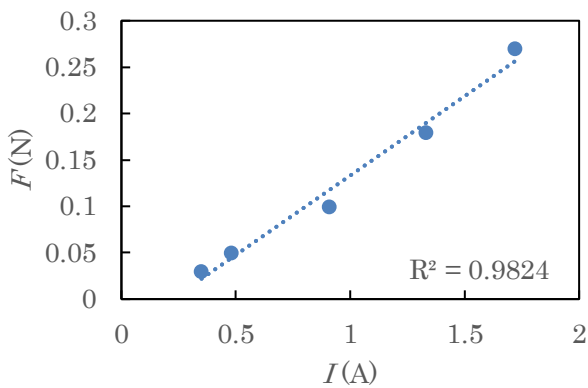


図6 電流と釘を引き寄せる力の関係

実験の結果、コイルに流れる電流(A)が強くなると、電磁石が釘を引っ張る力(F)も大きくなった。電流が強くなれば電磁石の磁場も強くなり、釘が受ける磁場の影響も大きくなると考えられたので予想通りの結果と言える。また、相関係数が0.9824となったため、回路を流れる電流の大きさと釘を引き寄せる力の大きさは比例の関係にあると言える。電流の値はコイルの作る磁場の強さにも比例しているため、コイルの作る磁場の強さと釘を引き寄せる力の大きさは比例の関係にあると考えられる。

②コイルの巻き数による鉄板を引く力の大きさの変化

100回巻、200回巻、300回巻の3種類のコイルを使用し、単3電池2本(約3V)と4本(約6V)の電圧でそれぞれ実験を行った。実験配置は図4と同様でコイルと電源の本数のみを変化させた。結果は図7の通りである。

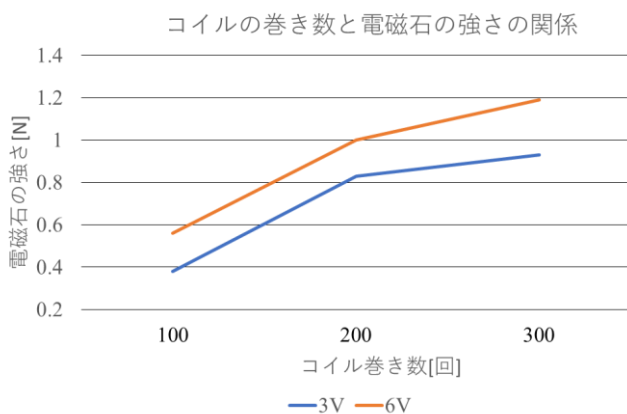


図7 コイルの巻き数と力の大きさの関係

グラフより、電源電圧が3Vのときも6Vのときもコイルの巻き数を増やしていくと釘を引き寄せる力は大きくなっているが、200回巻から300回巻にかけての力の増加は100回巻から200回巻にかけてのそれよりも小さくなっていることが分かる。コイルの作る磁場の大きさは n に比例するため、釘を引き寄せる力も n に比例するものと考えられたが、実際には比例していない。また、電源電圧

6Vの測定の際に100回巻から測定を開始して300回巻まで測定し、再度100回巻に戻して力の大きさを測定したときに力の大きさが元には戻らず半分ほどに減少してしまっていることがわかった(表1)。

表1 100回巻、6Vの条件での力の大きさの結果

巻き数(回)	平均[N]
100	0.56±0.12
100 (300回巻後)	0.28±0.23

このように、再測定で力の大きさが大幅に減少したことやコイルの巻き数と力の大きさが比例しなかった原因として以下の2点が考えられる。

- (1) 電源である電池が短い測定時間中に消耗し、起電力が低下した
一次電池は材料の化学変化が進むと電圧が低下していくため、電圧低下に伴って電流が弱くなり、磁場が弱くなった。
- (2) 回路が熱を持ち、抵抗の値が変化した

図5の回路は抵抗値の大きな外部抵抗を用いていないため大きな電流が流れ、熱を持ちやすい。導線や電池が熱を持つことで、導線や電池の内部抵抗値が上昇するため、回路を流れる電流の値が減少し、電流と比例する磁場の強さも減少した可能性がある。

まず、(1)の検証として図5の配置で再度実験を行った。電池の電圧を測るために30分間電流を流し、3分ごとに回路から電池を取り出して電池の両端の電圧を電圧計で測定した。この測定のために電池を回路から外している時間は平均30秒程度であった。結果は以下の図8のようになった。

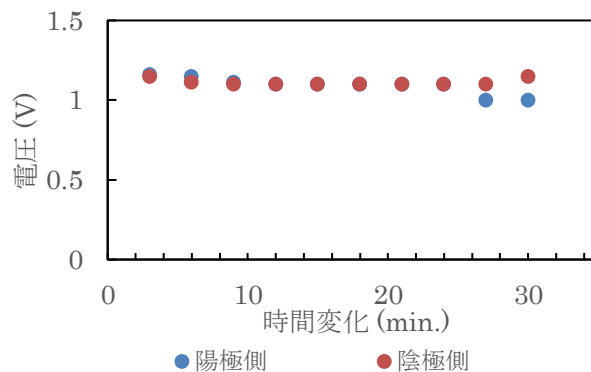


図8 電源電圧の時間変化

グラフから分かるように、30分間での電池の起電力の変化は±0.1V程度であり、図7の結果になるほど釘を引き寄せる力に大きく影響しているとは考えがたい。よって、電源である電池が消耗したことで電流が低下しているわけではないと言える。

次に (2) の検証として、図5の配置と、図5のスイッチと電流計の間に $10\ \Omega$ の抵抗を入れた回路で実験を行った。30分間電流を流し、3分ごとに非接触式の温度計(図9)を用いてコイルと電池の温度をそれぞれ記録した。コイルの温度変化は図10の結果となった。



図9 非接触式温度計

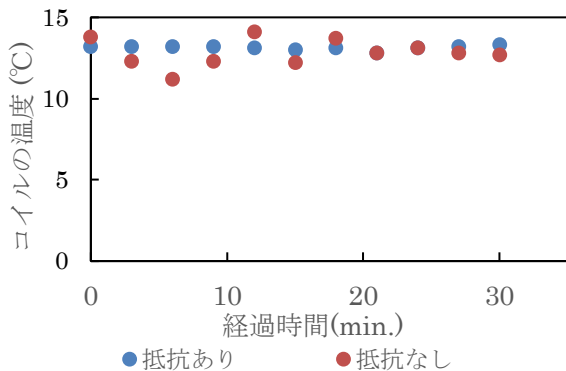


図10 コイルの温度の時間変化

このグラフより、 $10\ \Omega$ の抵抗がある回路ではコイルの温度は一定に保たれていることが分かる。抵抗がないショート回路においては温度が不安定であるが、抵抗があるときと比べて大きく温度が上昇しているとは言えないため、回路の抵抗値を大きくし、電流が小さくなる原因がコイルの温度変化ではないと結論できる。また、電池の温度変化は図11の結果となった。

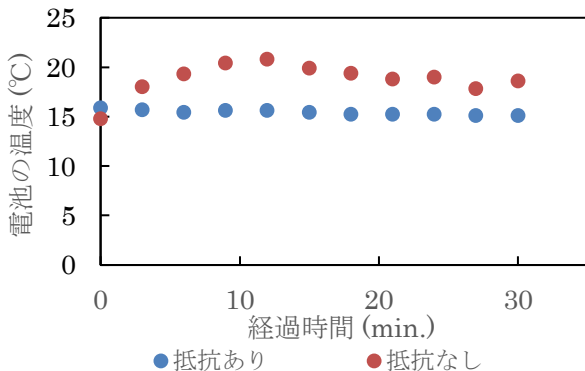


図11 電池の温度の時間変化

このグラフより、抵抗があるときの電池の温度は若干の低下傾向が見られるものの、およそ一定の値を保っているのに対し、抵抗がないときの電池の温度は上昇していることが分かる。仮説の通り、回路の温度が上昇していることが確認できた。

以上の結果をふまえて、電源に乾電池を使用すると発熱し、内部抵抗が変化するために動作が不安定になると考えられるため、電源を電池から電源装置に変更することとした。電源装置には回路内の電流が一定になるように電圧を調整する定電流維持の機能、また電圧が一定になるように電流を調整する定電圧維持の機能が付いている機器がある。今回は磁場の大きさを一定に保つことが目的なので定電流電源を使用して実験した。

4. 動作原理確認のための電信機

4-1. 装置構成

モールス電信機では既に動作を確認した電磁石のほか、ペンで点と線を打刻を記録するための紙テープが必要である。また、紙テープを一定の速度で巻き取る機構や、打刻をするためのペンおよびその固定具が必要になる。そこで、これらの試作・検討を行った。

4-2. 紙テープの巻き取り

なるべく一定の速度で紙テープを巻き取る必要があるため、人の力で紙テープを巻き取るよりも電気回路による巻き取り制御が望ましい。そこで、モーターによって紙テープを巻き取る設計とした。また、モーターの回転数を一定に保つためにこちらの回路も電源装置を使用した。(図13)

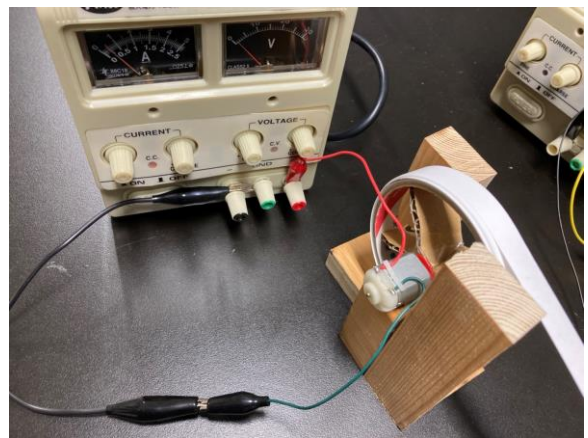


図13 紙テープの巻き取り部

回転部分はモーターの回転軸を十字状にかみ合わせた段ボールの中心に固定し、その段ボールをセロハンテープの芯にはめ込んで作製した。紙テープの端をセロハンテープの芯に貼り付けることで、回転に合わせて紙テープを巻き取ることができる。紙テープは $12\text{ mm} \times 40\text{ m}$ のものを用いた。紙テープの固定に用いた台を図14に示す。



図14 紙テープの台

構造はセロハンテープの台と同様にテープの芯を軸で支えるものとした。軸に使用したアクリルパイプは側面から外せるようにしたため、パイプを外すことで紙テープの交換を行うことができる。

以上の紙テープ巻き取り部と紙テープの台を組み合わせて紙テープを巻き取ることができる。

4-3. 紙テープへの打刻

鉄板が電磁石に引き寄せられた際に紙テープに記録を残せるように高さを調整して台を設計した。ペンはスチール缶を切り取って穴を開けて固定した。ペンを引き寄せるには大きな力が必要になるため、最も巻き数の多い300回巻のコイルを使用した。また、通電した際にコイルが熱を持ったため、手が触れにくくなるようにコイルを2方向から挟む形で台を置き、安全に実験が行えるようにした。打刻をする際に紙テープの両端の高さが異なるとテープの高さが増えたり減ったりするため、打刻する台の上に天井を設け、紙テープがその高さより高くならないようにした。(図15)

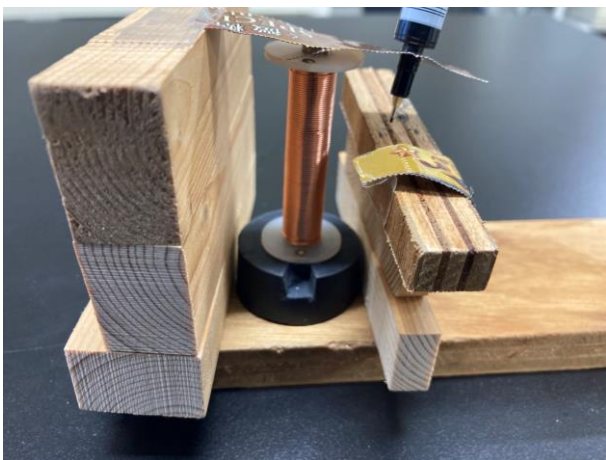


図15 紙テープの打刻部分

試作した紙テープの巻き取り機構と打刻部分を組み合わせた装置の全体像は以下のものとなる。(図16)

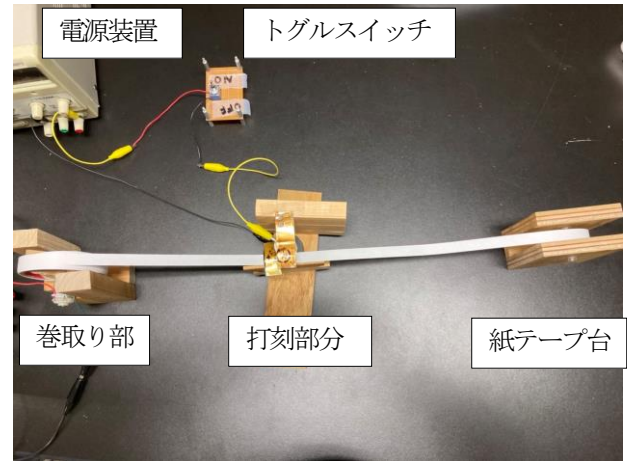


図16 モールス電信機の全体像

作製した装置を用いて実際にペンによる点と線の記録を紙テープにつける検証を行った。条件として、導線の長さは1m程度、コイルの回路の電流を1.00A付近、モーターの回路の電流を0.90A付近に統一して検証した。紙テープに点と線の記録を残す道具として何が適切かを調べるために鉄板に付けるペンの種類として、画鋏、鉛筆、ボールペン、サインペンを用いて比較した。その結果、画鋏およびボールペンは先端部分が硬く、紙テープに押しつけると瞬時に一定速度で流れる紙テープを停止させてしまうことが分かった。鉛筆は点の記録を行うことができたが、線の記録をしようとした際に、画鋏やボールペンと同様に先端部分に圧力がかかり、紙テープに触れてからわずかな時間を経て紙テープの流れを停止させた。モールス信号は点と線の組み合わせによって文字を判別するため、記録紙上に線の記録が残せなかったこれらの器具はこの装置に不適切であると言える。

それらとは異なり、残りのサインペンは軸先が柔軟なこともあり、電磁石で引っ張られたペン先が紙テープに触れている状態でも紙テープの巻き取りが止まることはなかった。記録自体も色濃くはっきりと残ったため、サインペンが適切な記録器具であると言える。(図17-19)

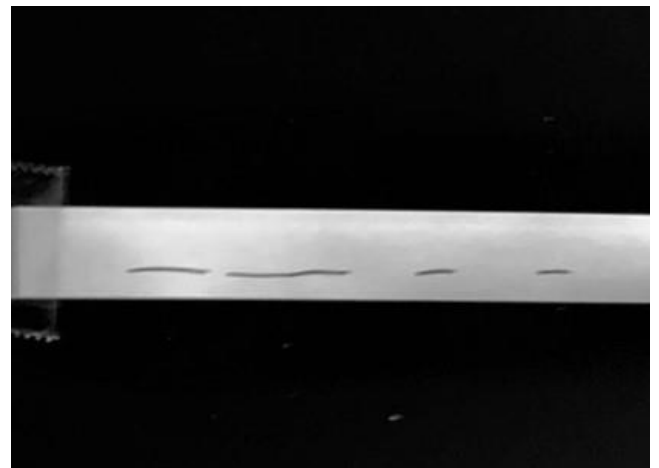


図17 サインペンを使用した紙テープの記録①

ここでは、「- - . . .」という点と線を記録しようと操作し、実際に「- - . . .」という記録が得られた。

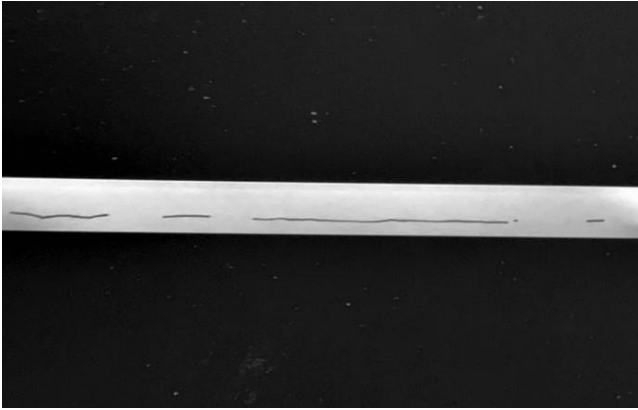


図 18 サインペンを使用した紙テープの記録②

次に「-」という記録をしようとしたが、「-」のような記録になってしまった。

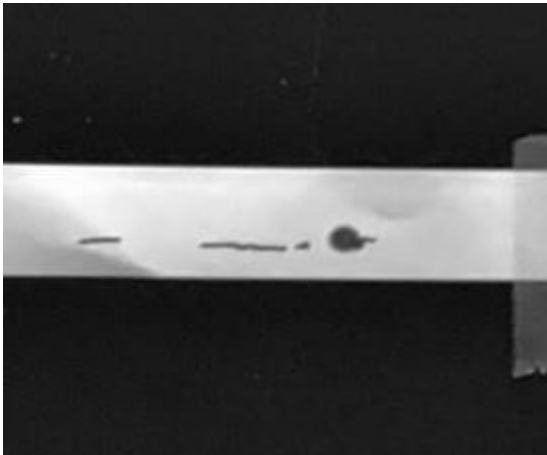


図 19 サインペンを使用した紙テープの記録③

最後に、「. . . -」という記録をしようとしたが、「. . . -」のような記録になってしまった。

上記の3つの記録は連続してとったものだが、1つ目を除いて正確に記録することができなかった。原因としては送信側のスイッチを切り替えて磁場をなくした際に、電磁石の鉄芯に残留磁場が残り、鉄板が鉄芯から離れるまでに瞬時ではなくわずかな時間を要することが考えられる。しかし、今回の教材の目的は電磁石の性質を伝えることが主なので、現在の結果でも点と線の記録を区別できること、単独の文字であれば伝達できることを満たしているため、残留磁場についての改善は特に行わないものとした。紙テープへの記録自体は残せたため、装置の構成は確定し、この装置を実際の通信を想定したものへと改良させた。

5. 実用的なモールス電信機の教材化

5-1. 導線の延長

動作の確認に使用した装置は導線が短く、送信側と受信側が近い距離で通信をしていたため、実際の使用を想定して10 m程度の長い導線を使用した。電源装置で一定の電流

になるように制御をしているため、導線の長さにかかわらず、短いときと同様に動作した。

5-2. 授業案の検討

作製した装置を実際に授業で使用の際に単元計画のどの時間にどのように取り入れるかについての検討を行った。ここでは東京書籍、啓林館、学校図書の3社が発行している第5学年の理科の教科書をもとに授業計画を比較・検討する。まず、各社の教科書は以下のような順番で単元の内容が記載されている。

○東京書籍

コイル、電磁石とは何かの説明
電流の有無による変化、電流の向きによる極性
電流の大きさ、巻き数による変化
電磁石の身近な利用方法を知る

○啓林館

コイル、電磁石とは何かの説明
電磁石の作製
棒磁石との比較(極性)
電流の大きさ、巻き数による変化
電磁石の身近な利用方法を知る

○学校図書

コイル、電磁石とは何かの説明
電磁石の作製
棒磁石との比較(極性)
電流の大きさ、巻き数による変化
電磁石の身近な利用方法を知る

以上より、3社とも概ね同様の流れで単元の内容が紹介されていることが分かる。今回のモールス電信機は、単元の最後の内容に設定されている電磁石の身近な利用方法という部分で使用できる。また、電流の大きさは電源装置で、コイルの巻き数は装置に入れるコイルによって変更できるため、既習事項の振り返りを含めた単元のまとめの活動にできると考えられる。

実際に使用するに際して、電信機で文字を解読できなければ通信を行う意味がなくなってしまうが、子どもたちが短時間で多くの文字を識別することは難しいと思われる。そこで、識別する文字の種類を3つ程度に絞り、ゲーム形式で楽しく学べるように体験的な活動を取り入れることとした。具体的には3択クイズを出題し、送信側の児童が選択肢を入力、受信側の児童が解答する、といった形式を想定している。装置の作製、授業案の詳細が確定するのに時間を要したため、実際に子どもたちの反応を見ることはできなかったが、想定した授業の略案を次のページに示す。

5. 本時の指導(4/4時間)

(1)目標

- ・コイルに鉄芯を入れて電流を流すと鉄芯が磁石になることを理解している。

(知識・技能)

- ・電磁石を強くするための方法を発案することができる。

(思考力・判断力・表現力)

(2)展開

段階	学習活動と学習内容	主な発問(○)と 予想される児童の反応(・)	○指導上の留意点 ◆評価	時間
導入	1. 前時までに学んだ電磁石の性質を確認する。	○電磁石とはどのようなものですか。 ○電磁石にはどんなはたらきがあるか。	◆鉄芯が磁石になるための条件や、電磁石を強くするための条件を理解している。(知識・技能)	5
	問題：電磁石は身近な生活でどのように使われているのだろうか			
活動	2. 電磁石の活用例を紹介する。		○モールス電信機以外は原理が複雑なため、電磁石を使用しているということだけを伝える。	5
	3. モールス電信機の教材を見せる。(低い電流)	○テープに記録をつけるためにはどうしたらいいですか。	◆電磁石の強さが足りていないことに気がつき、強くするための方法を発案する。(思考力・判断力・表現力)	8
	4. モールス電信機を使って3択クイズの活動をする。	・電流を大きくする。 ・導線を短くする。	○事前に適切な電流を測定しておき、その値を基準に装置を使用させる。 ○装置を停止させるまで紙テープ等に触らないように注意する。	18
片付け	5. 片付け		○コイルが熱を持つため、直接触れないように指導する。	4
まとめ	6. 単元全体の振り返りを行う。	○電磁石は身の回りでどのように使われていましたか。 ・モーター ○電磁石について学ぶ前と後で変化したことはありますか。	○本単元で学んだ知識を振り返ると共に、理科は日常生活で使われているという点にも注目させる。	5
終了				

4. まとめ

課題研究 I・II を通し、現状の理科教育の課題を解決する手立ての一つとしてモールス電信機の教材を試作することを計画し、試作に取り組んできた。その結果として電磁石を用いて原理の簡単な教材を製作することができた。一方で、動作の精度という点では少し不安定な点が見られ、自由に信号を送れるような装置には至らなかった。また、実際の授業での使用を想定して授業計画を立案したが、実際にその授業を行うことはできなかった。そのため、当初の目的であった子どもたちに理科の面白さや有用性を認識してもらおうという部分への効果は確認することができていない。

5. 今後の展望

装置を手軽に組み立てられるという点も意識して試作したが、金切ばさみやドリルなどの工具が必要となり、組み立てから子どもたちに行わせることが困難になってしまった。指導要領においてはものづくりの活動を取り入れる内容に当たるため、装置の製作自体も子どもたちに行わせられるような装置になることが今後の課題である。

参考文献

- 1) 小学校学習指導要領(平成 29 年告示)解説 理科編
文部科学省 平成 29 年 7 月 p. 9-10
- 2) 平成 30 年度全国学力・学習状況調査報告書【小学校/理科】
国立教育政策研究所 p. 42-43
- 3) 平成 27 年度全国学力・学習状況調査報告書【小学校/理科】
国立教育政策研究所 p. 30-32
- 4) 小学校学習指導要領(平成 29 年告示)解説 理科編
文部科学省 平成 29 年 7 月 p. 55
- 5) 郵政博物館 展示解説シート 貴重資料シリーズ No. 3
- 6) 新しい理科 5 年
東京書籍 p. 134-145
- 7) わくわく理科 5
啓林館 p. 154-167
- 8) みんなと学ぶ小学校理科 5 年
学校図書 p. 120-135