

修士論文

電子の動きに注目した電気回路の学習

指導教員 芝原寛泰

指導教員 谷口和成

提出 2007年1月19日

京都教育大学大学院 教育学研究科 教科教育専攻理科教育専修

落田 綾

＜論文題目＞

電子の動きに注目した電気回路の学習

＜目次＞

1章 はじめに	3
2章 研究の背景	5
歴史的背景	
水流モデル・パチンコ台モデルと粒子論について	
3章 研究の目的	9
4章 電流を電子の動きで捉えるための実験—量的・粒子的に捉える—	10
4-1 熱エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験	10
4-1-I 熱電対を用いた実験	10
ゼーベック効果の観察	
4-1-II ペルチェ素子を用いた実験	15
4-2 光エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験	18
4-2-I LED（発光ダイオード）を用いた実験	18
4-2-II 太陽電池を用いた実験	21
5章 電子の動きを表すモデル	24
5-1 押し出しモデル	24
5-2 数珠モデル	25
5-2-I 電子（負電荷）・正電荷	25
5-2-II 導線	26
5-2-III 電源	26
5-2-IV 抵抗	28
5-2-V コンデンサー	33
5-2-VI 回路	35
5-3 カリキュラムとの関わり	38

6 章 授業実践	4 3
6-1 授業実践について	4 3
6-2 授業案・ワークシート・アンケートの内容	5 0
6-3 アンケート結果	6 6
6-4 授業実践より	8 1
7 章 総括	8 4
付録	8 6
ゼーベック効果について	
ペルチェ効果について	
ペルチェ素子（ペルチェモジュール）について	
通常のペルチェ素子の実験方法について	
中学校理科の教科書の例	

1章 はじめに

高校物理において、電子の流れとは電流の流れの逆方向のものであるとして登場してくる。電子の存在というものは学習しているが、それが電気回路においてどのような働きをしているのかと言うことについての学習はほとんどしない。例えば、現行の物理Ⅰ¹⁾の教科書の「電気とエネルギー」の章のなかの「電流」という単位では、“自由電子は電圧をかけると導線中を移動して電子の流れを生じる。この電子の流れを電流という”という表現がある。また“電流の向きは負の電荷をもつ電子の動く向きとは逆である”や“電気抵抗とは電流の流れにくさであり、電子が運動エネルギーを失うことが原因”という表現にとどまっている。電流の方向の定義付けについては、いくつかの説がある。1830年頃ファラデーが「電流とは、プラスの電荷が、プラスの電極側からマイナスの電極側に移動することである」と定義付けた²⁾や、誰がいつ決めたのかわからないが「電流の方向はプラス電気の流れる方向」と決められている³⁾という説がある。他には、電気の正負は、原子核や電子が発見される1世紀半ほど前に、フランクリン(B. Franklin)が電気は1種類であり、絹でガラスをこすったとき、絹からガラスに電気が移りガラスが電気過剰(正)、絹が電気不足(負)という想定をしたことに由来する⁴⁾という説や、17～18世紀にヨーロッパで電気の実験をするのに良く用いられたガラス球に柄を付けて回転させ手のひらをガラス球にのせて摩擦する摩擦起電機では、手からガラスに電気が移ると考えられていたもので、ガラス球に生じる電気を正と決めた後に、ガラスから手に電子が移ることが明らかにされた⁵⁾、などである。このように電流の定義付けには様々な説があるが、電流の向きは電子の流れの逆になるという説明の歴史的背景としては、電流の定義がなされた後、J.J. トムソンにより1897年に原子より小さいものとして最初に知られた粒子、電子が発見された⁶⁾ことがあげられる(しかしこの発表に関する論文が認められたのはそれから10年ほど後³⁾)。

一方、高校化学では電気の流れを電子に注目して話を進めていく場合が多く、例えば酸化還元の単位における電池・電気分解の学習では電子の流れに注目して考えている。また、現行の物理の教科書では、静電気の部分に関しては電子を用いて説明しているが、回路の話ではほとんど電子が用いられていない。しかし、高校物理Ⅰ¹⁾の教科書における「電気とエネルギー」の章ではほとんどの単位(1 電荷と静電気力、2 電流、3 電界と仕事、4 オームの法則と電気抵抗、5 ジュール熱、6 電力量と電力で電子)で電子が登場してくる。回路内のエネルギーを考える際には電子が必要なことがわかる。

また、最近の電子機器の多くは半導体が使われている。教科書においても半導体について触れられていて、半導体内部の様子を図では電子が用いられており、機能の説明では電子の挙動に注目している。回路の中に半導体を組み込んで考える際には電子の方が捉えやすいのではないだろうか。また、半導体材料による熱や光を生み出すまたは熱や光から電気エネルギーを生み出す現象（ペルチェ効果やゼーベック現象）などは、電子を用いて説明したほうがわかりやすい。

同じ教科でも、物理・化学の分野によるとらえ方や、電子の挙動の取り入れ方などに違いがあると、生徒が学習を進めて行く上で、矛盾や混乱が生じるのではないかと考えた。それならば、電気回路でも半導体や電気化学の場合と同様に電気の流れを電子の流れで考えたほうが捉えやすいと考えられる。

本研究では、高校物理において、粒子としての電子の動きに注目した回路学習を提案し、そのための教材開発と授業実践を行った。ただし、授業実践は高校物理の前段階の学習として、中学校理科第一分野を対象にして行った。

<1章 参考・引用文献>

- 1) 三浦登ほか 24 名、平成 14.3.10 検定済、平成 16.1.20 印刷、平成 16.2.10 発行、
物理 I、東京書籍
- 2) 酒井雅芳、1995、－イラストで－電気のことがわかる本、p.17、新星出版社
- 3) 藤村哲夫、2002、ブルーバックス B-1367 電気発見物語 見えないものが、どのように明らかになったか、pp.254、講談社
- 4) 兵頭俊夫ほか 19 名、2003 年 3 月 25 日初版印刷、2005 年 3 月 25 日 3 版印刷、
2005 年 3 月 30 日 3 版発行、高等学校物理 I、三省堂
- 5) 藤本文範ほか 20 名、平成 5 年 2 月 28 日文部省検定済み、平成 6 年 2 月 1 日印刷、
平成 6 年 2 月 10 日発行、高等学校新物理 I B、第一学習社
- 6) 植村美佐子・海部宣男・香原志勢・道家達将・藤村淳・八杉貞雄・山下昇 編訳者、
1993、科学年表－知の 5000 年史－、丸善

2章 研究の背景

歴史的背景

なぜ、電子の流れと電流の流れる方向が逆か。現行の物理の教科書では電子に関して、自由電子は電圧をかけることにより流れを生じ、この電子の流れを電流という、電流の向きは負の電荷を持つ電子の動く向きとは逆であると記述されている。1章ですでに述べたように、この説明の歴史的背景として、「電流とは、プラスの電荷が、プラスの電極側からマイナスの電極側に移動することである」と定義付けられた後、電子が発見された事があげられる。

水流モデル・パチンコ台モデルと粒子論について

現在、電流を表すモデルとして水流モデルが多く用いられている（図2-1、2-2）^{1) 2)}。水流モデルは電流を水の流れて表したもので、日本だけでなくイギリスのアドバンシング物理の教科書³⁾にも登場し、幅広く用いられている（図2-3）。水流モデルは、電流の動きを表すことについては適しているが、電子の粒子的な側面を表すこと、また正電荷と負電荷（電子）の両方に注目し、両者の電氣的なバランスを考えるには不向きである。

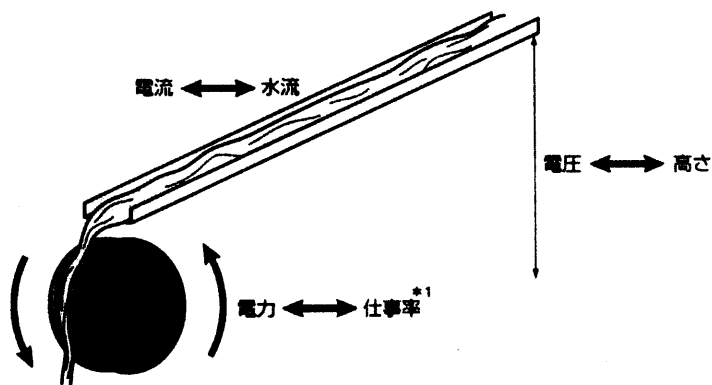


図2-1 水流モデルの例① <東京書籍物理I¹⁾より>

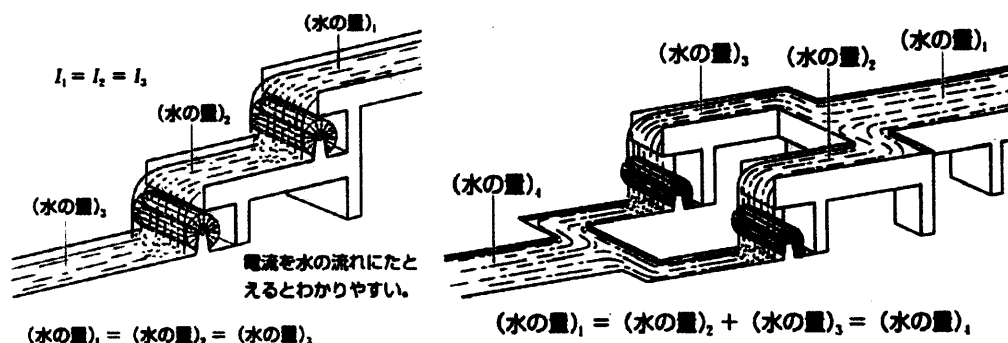


図2-2 水流モデルの例② <大日本図書1分野上²⁾より>

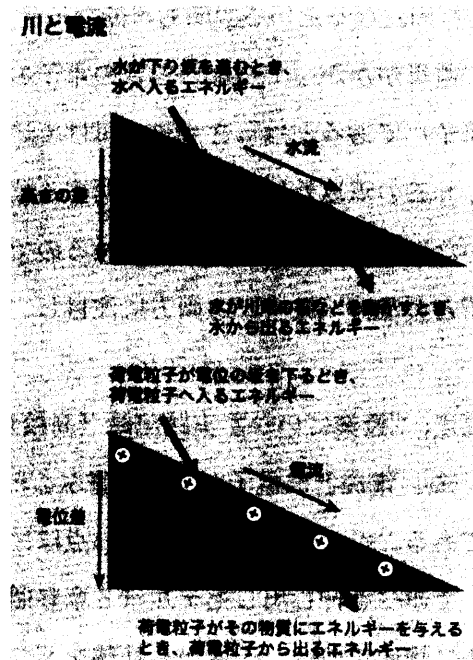


図2-3 アドバンスング物理の水流モデル

＜アドバンスング物理 あたらしい物理入門³⁾ より＞

また、滝川洋二氏⁴⁾や滝川亮氏⁵⁾、西島信淵氏⁶⁾、など多くの人が電流を電子で捉えようと唱えている。スコットランドでは、教師らが電流はマイナスからプラスに流れることに決め、小学校から高校まで一貫したカリキュラムで行われている⁴⁾。そして、電流を電子で捉えたとまではいなくとも、粒子的に捉えようという説明がなされている本も多く出版されている(2章参考・引用文献7)、8)、9)など)。また小学校レベルで電流を電子で捉えようという試み¹⁰⁾もある。このような動きがある中、水流モデルでは電子の動きに対応出来ない部分が多い。

電子を表すモデルとして有名なモデルに、パチンコ台モデル¹¹⁾がある。ドルーテが考えた金属中の自由電子は、気体分子のように激しく熱運動をしているものであった。これが電場の中で加速された場合、障害物がなければどんどん加速されて電流も無限に大きくなるはずだが、実際は一定の値にとどまる。そこで、ドルーテは物質の中に何か適当な障害物を考えて、電子がぶつかるたびに電場で加速された分は失い、また加速するということを繰り返すと考えた。この考えを、最もよく表しているのがパチンコ台モデルである。もともとの斜面(斜面の落差を電位差と考える)に抵抗はなく、釘との衝突によって玉の加速にブレーキがかかる仕組みがわかりやすい。また、障害物(釘)が多いほど電子は小刻みな衝突を繰り返し、流れが悪くなるので抵抗の大小がよく説明でき、衝突により失われ

た運動エネルギーが発熱の原因になるという説明も可能なモデルである。しかし、一方で、電子の熱運動には触れず、電場がかかっていないときの電子の速度を0としている、金属中の障害物を陽イオン（原子）であるとはっきり決め付けている、などの問題点が一般的に挙げられている。しかし、この点以外にも抵抗を説明するには適しているが、回路全体の様子を表すには適していないなどの問題点も挙げられるのではないだろうか。また、先ほどの水流と同様、正電荷と負電荷（電子）の両方に注目し、両者の電氣的なバランスを考えるには不向きである。

電子の動きに関する研究に、「授業にいかす実践記録（高校）“キャパシタで電気容量をみる”」¹²⁾が報告されている。電流とは電子が電気を運ぶことを強調し、教材にはコンデンサーを用いた学習内容である。この研究で注目したい点は、電子の動きで捉えている点以外にも、5章（5-1）で述べる押し出しモデル（5章参照）に類似したモデルが登場している点である。レールに鉄球を並べ、一方から鉄球をぶつけると、もう片方の鉄球が飛び出すというモデルが紹介されている。本研究では、弾性衝突を用いていないことや、押し出される球の数や押し出す力の大きさについても定義しているため、相違点も多く存在する。しかし、他にも研究が進められていることから、本研究の必要性が挙げられるのではないだろうか。

本研究で提案しているモデルは、電子の粒子的な側面を捉え、正電荷と負電荷（電子）の電氣的なバランスに注目し、回路内での負電荷（電子）の電子の動きを考えるものである。

<2章 参考・引用文献>

- 1) 三浦登ほか 24 名、平成 14.3.10 検定済、平成 16.1.20 印刷、平成 16.2.10 発行、
物理 I、東京書籍
- 2) 戸田盛和ほか 47 名、平成 13.2.28 検定済、平成 14.2.1 初版印刷、平成 14.2.5 初版発行、理科 1 分野上、大日本図書
- 3) J. オグボーン (Jon Ogborn)・M. ホワイトハウス (Mary Whitehouse) 編者、
笠耐・西川恭治・覧具博義 監訳者、2004、アドバンスング物理 新しい物理入門
(Advancing Physics AS)、2 章 センサー、pp.232、日経印刷
- 4) 滝川洋二、2003、どうすれば「理科」を救えるのか、3 章 ④スコットランドでは、
電流の流れる方向が違う、pp.256、亜紀書房

- 5) 滝川亮、2001、電流の向きを「マイナスからプラス」に変えよう、科学 Vol.71 No.4/No.5、
p.323-325
- 6) 西島信淵、電流と電子（中2）、『理科教室』2002年12月号、p.22-27
- 7) 湯村幸次郎、2006、未来を切り開く学力シリーズ 図でわかる中学理科 1分野（物理・化学）、第3章 電流と電圧、pp.198、文藝春秋
- 8) 酒井雅芳、1995、－イラストで－電気のことがわかる本、PART1 電気の基本、
pp.253、新星出版社
- 9) 古川修文、1981、誰にもわかる やさしい電気の一般知識、1 電気とは何か、pp.222、
新星出版社
- 10) 石田健作・日高晃昭・本間均、2005、科学を“教える”ことから広がる子どもの学びの可能性－小学校における電流概念獲得のための粒子モデルの導入を通して－、理科教育学会発表集（要旨）、p.102-103
- 11) いきいき物理わくわく実験
- 12)

3章 研究の目的

本研究の目標は、大きく分けると次の2点である。

まず、1点目は同じ理科という教科にもかかわらず物理分野と化学分野における回路内における電子の取り扱いの違いをなくすことである。高校化学での酸化還元・電池・電気分解の分野での回路の取扱いは電子を中心に話を進めているが、高校物理の回路学習においてはほとんど電子は登場して来ない。

2点目は、物理分野内における統一性である。1章でも述べたが高校物理における回路学習では電子の取り扱いがほとんどない。しかし、半導体機能の説明では電子による扱いが適している。むしろ、電子なしでは説明できない。また高校物理のエネルギー分野では電子を取り扱っている。電子の運動エネルギーを求める問題なども取り扱われている。その際に電子の速度についても触れられているが、電子の運動速度というのは決して大きくはない。では、電子は回路内でどのように動いているのか、疑問に思う生徒も出てくることだろう。また、教科内における矛盾という点は中学校理科第一分野についても起こっている。回路学習の導入部分では静電気が用いられており、静電気の仕組みについて、出版社によりマイナスの電気の粒・電子など表現の違いはあるが電子が用いられている。しかし、回路の学習に入ると電子については触れられていない。

本研究の目的は以上の2つの点を解決するための教材を開発することである。上記の教科内における統一、物理分野における統一の2点の解決を中心に、高校物理分野を中心に教材実験の開発やモデル化を行った。教材実験は回路内での電子の動きを量的・粒子的な側面から捉えることができるものを提案することが目的である。現行の水流モデルとは異なる、電子を用いた捉え方ができるモデルを提案する。特に、負電荷（電子）動きだけでなく、正電荷とのバランスに注目すること、抵抗値を具体的な数値で捉えることが大きな目的である。正電荷とのバランスに注目することは、半導体の機能の説明や中学理科で学習する電流との整合性を持たせるためである。また、抵抗値を具体的な数値で捉えることは、回路内に水路を妨害するものを置き抵抗値としていた水流モデルと比較して、より具体的に抵抗値の大小を表すためである。

回路の学習は、小中高を通して学習する内容である。そこで、高校の前段階として回路に関する理解度や知識を知ること、電子の基本的な概念を理解することができるかということを検討する目的で中学校第一分野における授業案の作成・授業実践も行った。

4章 電流を電子の動きで捉えるための実験—量的・粒子的に捉える—

電流を電子の動きで捉えるための実験として、熱エネルギーの電気エネルギーへの変換及び光エネルギーの電気エネルギーへの変換を扱うことを考えた。これらの実験は与えられる熱エネルギーや光エネルギーの量の変化によって、得られる電気エネルギーの量が変化するので、量的にエネルギー変化を捉えることが可能である。また、光や熱というのは物理・化学の分野に関わらずある一定のエネルギーをもつ量子の集合として捉えることができる。それらのエネルギーが電気エネルギーへと変換され、量的な変化も伴うことから、電気エネルギーに関しても粒子（電子）で捉えやすくなる。

回路内では電池などによる電位差が存在しなければ、電子は流れない。電位差が存在することにより、回路内の電荷のバランスは崩れるので、電子の流れが生じる。そこで、本研究では電位差を与える電源部分に注目して電子の動きを考えることにした。電位差を与えるものとして熱エネルギーから電気エネルギーへの変換、光エネルギーから電気エネルギーへの変換の2つの実験を教材として取り上げる。光→電気エネルギー変換の実験は、照度（光子の数）と電圧（押し出される電子の数）の関係から、熱→電気エネルギー変換の実験は、熱エネルギーと電圧（押し出される電子の数）の関係に注目すると、電子を粒子として捉えることが可能な教材実験といえる。

4-1 熱エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験

4-1-I 熱電対を用いた実験

ゼーベック効果の観察

ゼーベック効果については付録を参照のこと。

<目的>

ゼーベック効果を応用した実験を行い、熱と電子の動き及び量的関係について測定する。

<実験4-① 熱電対として用いる金属の検討>

熱電系列を示す¹⁾。

Sb Fe Mo Cd Au W Cu Ag Zn Ir Rh Pt・Rh Pb
Sn Al C Pt Hg Na Pd K Co Ni constantan
Bi

熱電系列において、離れている2種の金属を用いてゼーベック効果の観察を行うほど、大きな起電力が得られる。しかし、教材実験として用いるためには入手しやすく比較的安価な金属材料が適している。そこで、いくつかの金属の組み合わせで以下のように実験を行った。

＜実験方法＞

金属のどの組み合わせが大きな電圧が得られるかということを検討するために、接点を約100℃の湯水と約0℃の氷水に金属線を浸けた時の電圧を調べた。電圧の測定はテスター（METEX 製、M-4660A）を用いて行った（図4-1）。測定時の室温は約24℃である。ゼーベック効果は、2点の温度差により起電力が生じる現象である。本実験では、室温と湯水や氷水によって与えられた温度との差によって生じている。接点は2種の金属をねじり合わせ、さらにハンマーで軽くたたいて密着をよくして実験を行った。銅とアルミニウム、鉄と銅、また熱電対の代表的な例としてあげられることの多いクロメル-アルメル（CA）^{注）}の3通りの組み合わせについて行った。本実験では水を使うため、鉄に関してはさびにくいピアノ線を用いた。

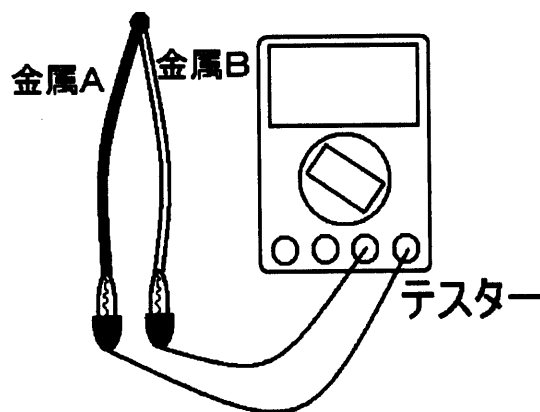


図4-1 熱電対の電圧測定方法

注) ²⁾

クロメル (chromel)・・・(成分) ニッケル89%、クロム9.8%、微量のマンガン・ケイ素、クロムを含むため、わずかに緑がかっている。

アルメル (alumel)・・・(成分) ニッケル94%、アルミニウム2%、ケイ素1%、マンガン2.5%、ニッケル含有量が多いアルメルは弱い磁性体で磁石に吸引されるのでクロメルと区別できる。

<実験結果>

実験4-①の結果を表4-1に示す。

表4-1 室温24℃で測定した電圧(単位:mV)

温度 \ 組み合わせ	銅(A)と アルミニウム(B)	鉄(A)と 銅(B)	クロメル(A)と アルメル(B)
約100℃	0.18~0.21	0.39~0.40	3.04~3.10
約0℃	0.07~0.10	0.15	0.77~0.78

<考察>

組み合わせによっては電圧値が不安定になり、銅とアルミニウムあるいは鉄とアルミニウムの場合では測定が困難であった。これは接触抵抗が大きく、また測定値が小さいため変動が大きくなったと考えられる。以上より教材としては不向きだと考えられる。

<実験4-② 熱電対を用いた教材実験>

教材実験として用いる際に重要となってくるのが、温度変化に伴う電圧変化の測定である。ガスバーナー(約800~1000℃)などで直接加熱すると約35mVという大きな数値が得られるが、温度変化に伴う電圧変化を簡単に測定するという点では不向きな方法である。そこで以下のような方法を考えた。

<実験方法>

500mlビーカーに3分の1から半分ぐらいまで水を入れる。氷を入れて温度を下げる際に、あふれない様にするためである。ガスバーナーで加熱し、水を沸騰させる(図4-2)。そして氷を入れて温度を下げながら電圧変化をテスター(METEX製、M-4660A)で測定する(図4-3)。測定を行う際の温度に関しては5~10℃の範囲の変化を目安にして測定する。データ整理の際に比例関係があることが読みとればよい。5℃ごと、あるいは10℃ごとと決めて測定を行うと氷の量の調節に手間がかかる。ビーカーの水が少なすぎると、電圧を測定している際に、気温の変化を受けやすくなり、測定中の値が変動する。測定の際、沸騰後に、氷をいれて温度を下げると、加熱して温度を上げながら測定する場合よりも時間が短縮される。また、バーナーによる加熱では温度制御が難しく、測

定にも時間を要し、電圧値も不安定である。

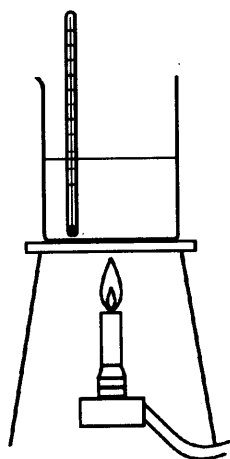


図 4 - 2

ガスバーナーで加熱する

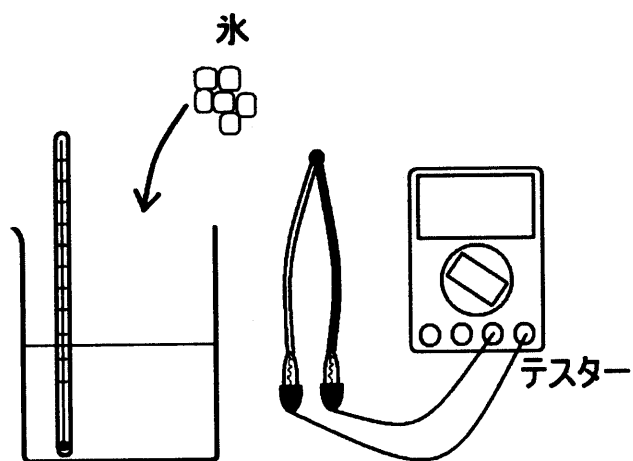


図 4 - 3

氷を入れ温度を下げながら測定を行う

<実験結果>

予備実験 4 - ①の結果より、教材として適していると考えられるクロメル・アルメル、鉄と銅の組み合わせについて電圧測定の実験を行った。以下に結果を示す。

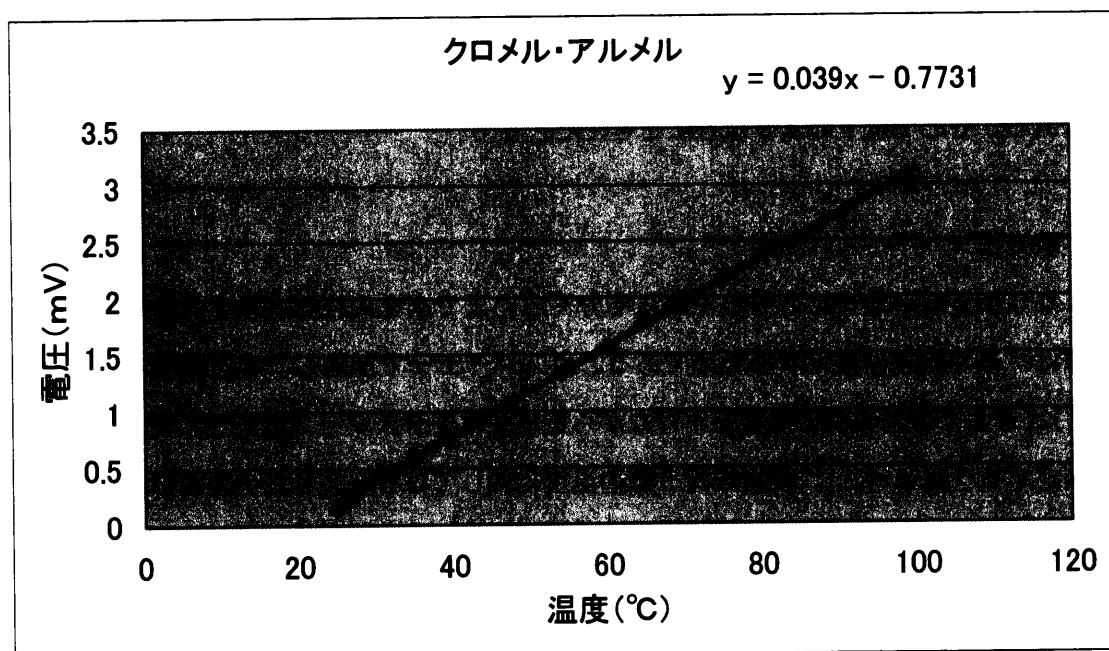


図 4 - 4 クロメル・アルメルの温度変化に伴う電圧変化

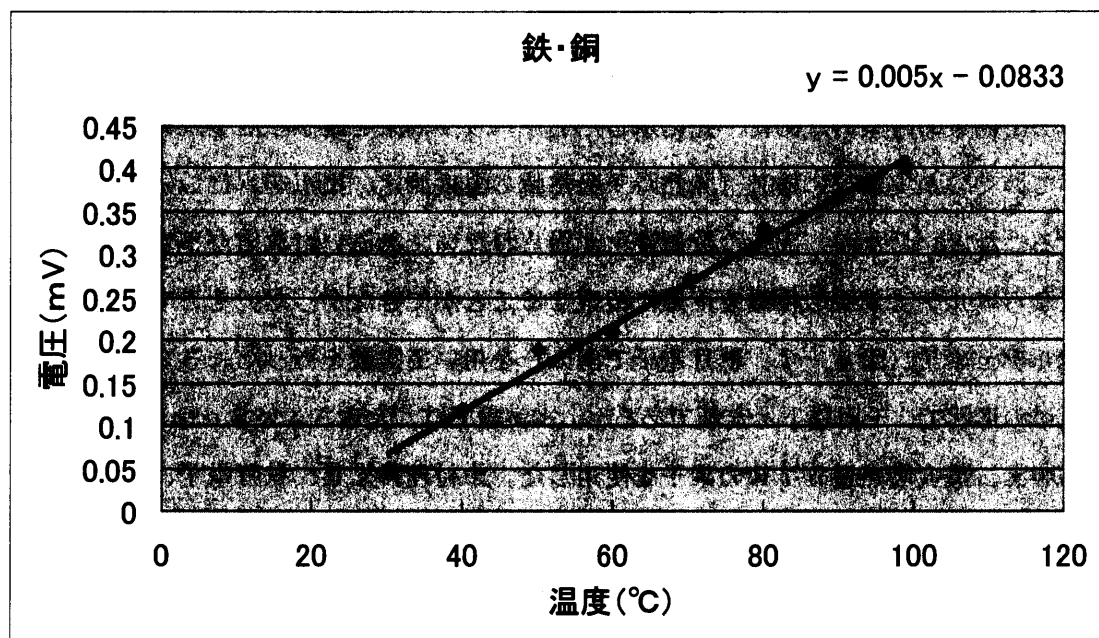


図4-5 鉄・銅の温度変化に伴う電圧変化

クロメル・アルメルの組み合わせ、鉄・銅の組み合わせ共に電圧と温度が比例関係を示している。

<考察>

図4-4、図4-5より、クロメルとアルメル、鉄と銅の組み合わせはともに電圧と温度が比例関係を示しているの、熱エネルギーと電気エネルギーの量的関係について生徒が考えることができる。これは、ゼーベック効果が熱エネルギーにより自由電子の運動が活発になることが原因で起こるためである（付録参照）。このことから、粒子的に捉えることも出来る。また起電力の高い方から低い方へと電流が流れることから（図4-6）、電荷のバランスについても考えることができる。電荷のバランスを考えることは、5章で述べるモデルを考える上で重要な概念となる。

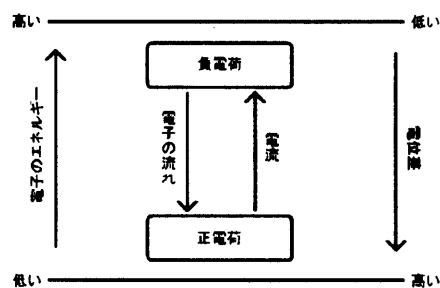


図4-6 エネルギーの高低³⁾

4-1-II ペルチェ素子を用いた実験

ペルチェ素子の原理等については付録を参照のこと。

ペルチェ効果の観察のために、先に示したゼーベック効果を観察した金属の組み合わせを用いていくつか実験を行い検証（発熱時・吸熱時の温度測定、接点を水につけ温度変化を観察する、など）したが、大きな数値変化が得られない、あるいは数値が不安定であることなどからペルチェ効果の特徴を正確に観察することができなかった。そこで、市販品であるペルチェ素子（図4-7、秋月電子で購入）を用いて実験を行った。3×3 cm、4×4 cmの形状で、千円以下と安価である^{a)}。本実験では、大きさ3×3 cm、12 V用、6 A max、最大吸熱量57 Wの素子を使用した。中村理科工業、秋月電子、2社の素子を用いて実験を行ったがどちらも同じ結果が得られた。

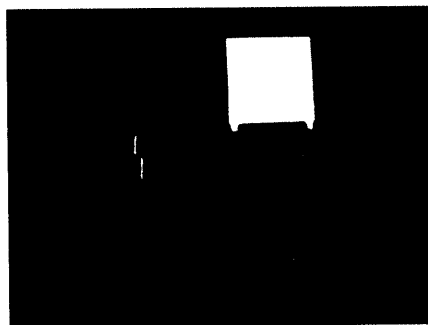


図4-7 ペルチェ素子^{a)}

<実験4-③ ペルチェ効果の観察>

市販品のマニュアル（中村理科工業）を参考に実験を行った。

ペルチェ素子を電源（単3電池、1.5 V×2本使用）に接続すると、すぐに吸熱反応が起こる。温度が急激に下がるので手でさわることによって簡単に観察することが出来るが、どの程度急激に温度が下がっているのかを捉えやすくするために、目で見て観察する方法は以下の通りである。本来、ペルチェ素子は吸熱側ではない方に、放冷ファンを取り付けて実験を行う（付録参照）。しかし、本実験では放冷ファンを取り付けずに行う方法を考えた。これは、教材として用いる際の費用の問題と、放冷ファン以外の身近なものをを用いる事により、冷やしているのだという事をわかりやすくするためである。また、放冷ファンの使用に関する巻き込みやメンテナンスなどの気遣いが必要なく、放冷ファンを用いるよりも実験が簡単に行える。

放冷ファンのかわりに、保冷パック（凍らせて使用するタイプのもので、水やジェル状

など内容物は様々であるが、どれを用いても特に問題はなかった）を用いる。氷を用いても実験は可能であるが、ペルチェ素子は水分を嫌うものが多く、使用後のふき取り作業を念入りに行わなければならないことや、密着をよくするための工夫が必要になる。ペルチェ素子の表面は平らである。その面との密着をよくするために保冷パックは、凍らせる際に平らなもので挟む等をするといよい。平らに凍らせた保冷パックを、放冷側に合わせ電源を入れる（この時の、吸熱側の温度は $-3.5 \sim -3.8^{\circ}\text{C}$ ）。電源には単3電池 1.5Vのものを2本用いた。吸熱側に、スポイトなどを用いて水を一滴落とすと水滴が凍る（凍るまで、平均約 1 分程度かかる）（図4-8）。水滴が凍っていることの観察方法は、ペルチェ素子を逆さまにしても水滴が垂れないことや、氷っているので針や細い針金などが刺さるということから確認する（実際にさわってみても実感できる）。

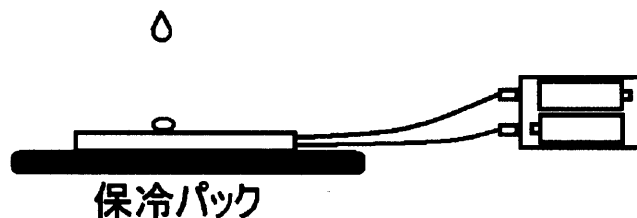


図4-8 ペルチェ素子を用いた実験

<実験4-④ ペルチェ素子を用いたゼーベック効果の観察>

ペルチェ効果はゼーベック効果の逆の現象なので、ペルチェ素子を用いてゼーベック効果を観察することも可能である。先ほどの、ペルチェ効果の観察と同様に、平らに凍らせた保冷パックを用いてゼーベック効果に必要な温度差を与え、実験を行う。先ほどのペルチェ効果の観察実験で、電源（電池）を接続していた部分にモーター^{b)}を接続しておく。保冷パックを放冷側に当て、吸熱側に手を当てる（お湯の入ったビーカーの底などを当てることでも可能）。すると、温度差によりゼーベック効果が起こりモーターが回る（体温（手）と保冷パック（ 1.5°C ）で約 0.5V）（図4-9）。

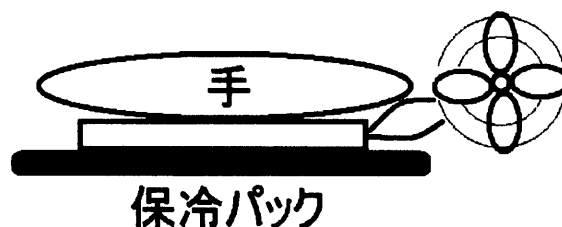


図4-9 ペルチェ素子を用いたゼーベック効果の観察

4-2 光エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験

LED（発光ダイオード）は、通常、電気エネルギーを光エネルギーへと変換するものであるが、しかし、逆に光を当てることにより電気エネルギーを取り出すことも可能⁵⁾である（図4-10、4-11）。

そこで、LED のもつ整流作用（電流が流れる向きと流れない向きがある）や、光エネルギーを電気エネルギーに変換できることに注目した実験により、電子の動きと働きについての学習が深められないかと考えた。LED を用いることにより、電気から光を発する、光を吸収し電気エネルギーを作り出すという全く逆の2つの現象を同じ素子で行える。以上の実験を教材に用いれば、電子の流れについて理解しやすいのではないかと考えた。すでに述べたように、現行の物理の教科書等にも半導体の現象については、電子で説明されている。正孔（ホール）という用語も登場しており、正孔（ホール）の動きに注目すれば、中学校で学習した電流の流れと整合性を持たせることができる。

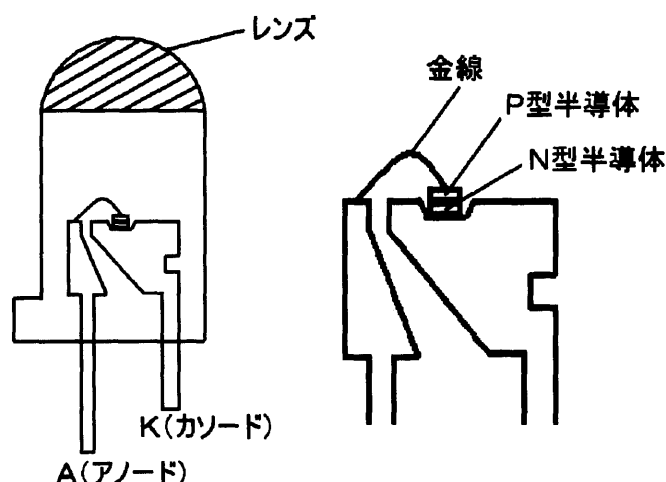


図4-10 LEDの構造⁴⁾

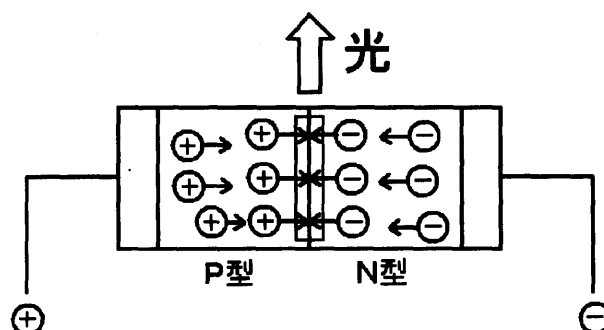


図4-11 LEDを用いて光エネルギーを取り出す⁵⁾

4-2-I LED（発光ダイオード）を用いた実験

<目的>

LED（発光ダイオード）は、電気エネルギーを光エネルギーへと変換するものである。この機能や半導体に関しては、現行の教科書（東京書籍物理Ⅰ⁶⁾）等でも電子の動きを用いて説明されている。半導体の持つ機能、整流作用を説明する際には電子の挙動に注目しなければならない。LED（発光ダイオード）を用いて実験を行うことにより、電子の動きに注目させることができる。また、光量と電圧値の関係から電子を量的に捉えること、さらに光は粒子であることから、光の粒（光子）からエネルギーをもらう電子も粒子であると発展させることが可能である。LEDを応用した実験を行い、光と電子の動き及び量的関係について測定する。

<実験4-⑤ LEDを用いた光エネルギー→電気エネルギーの変換実験>

光エネルギー→電気エネルギー変換の実験では、照度（光量・光子の数）と流れる電子数との関係から、回路内の電子の動きに注目する。LEDの光電効果を用いて光→電気エネルギーの変換を行う。LEDは電気エネルギーを光エネルギーに変える素子だが、構造的には、P型、N型の半導体の接合を利用しており、フォトダイオード（太陽電池）と同じである。これらの接合部は、強い電場ができています。そこに光が入り、電子を伝導体に乗せると、電子と、後に残った正孔が電場でそれぞれ逆向きに加速される⁸⁾。照度が大きいということは与えられる光エネルギーが大きいということである。照度が増えた際の電流・電圧の数値の変化の関係から、電位差を与える電子を量的なイメージで捉える（図4-12）。また、光子は粒子なので照度（光量・光子の数）と光子によってエネルギーを与えられる電子も粒子であるとイメージしやすい。

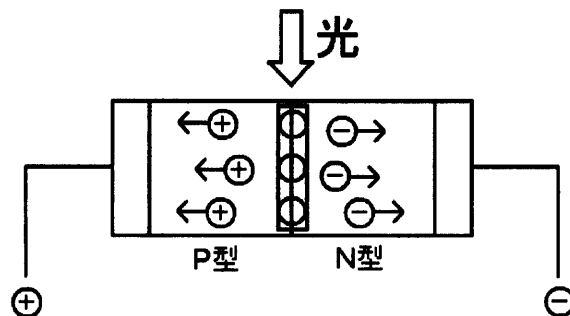


図4-12 LEDの原理⁵⁾

<実験方法>

受光部（LED）と光源の距離を変えながら照度を制御し、電圧の変化をテスター（METEX 製、M-4660A）で測定した（図4-13）。このときに、用いた赤色LEDは、動作電圧 3.0V、0.25Aで動作する。赤色のLEDは比較的安価で、入手しやすい。光源には一定の光量を放つ、電気スタンドの蛍光灯（27W、MITSUBISHI 製、3波長形白色光）を用いた。

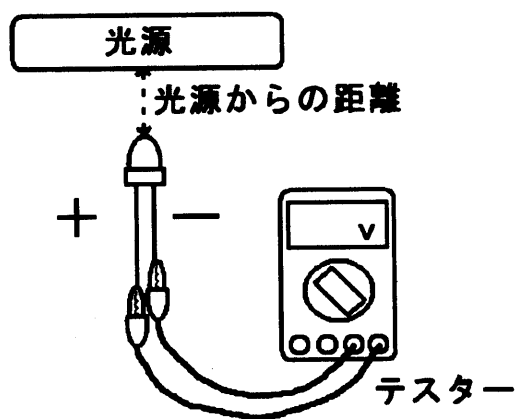


図4-13 測定方法

<実験結果>

光エネルギー→電気エネルギー変換の実験の光源からの距離を変化させた時のLEDから得られた電圧の測定結果を図4-14に示す。

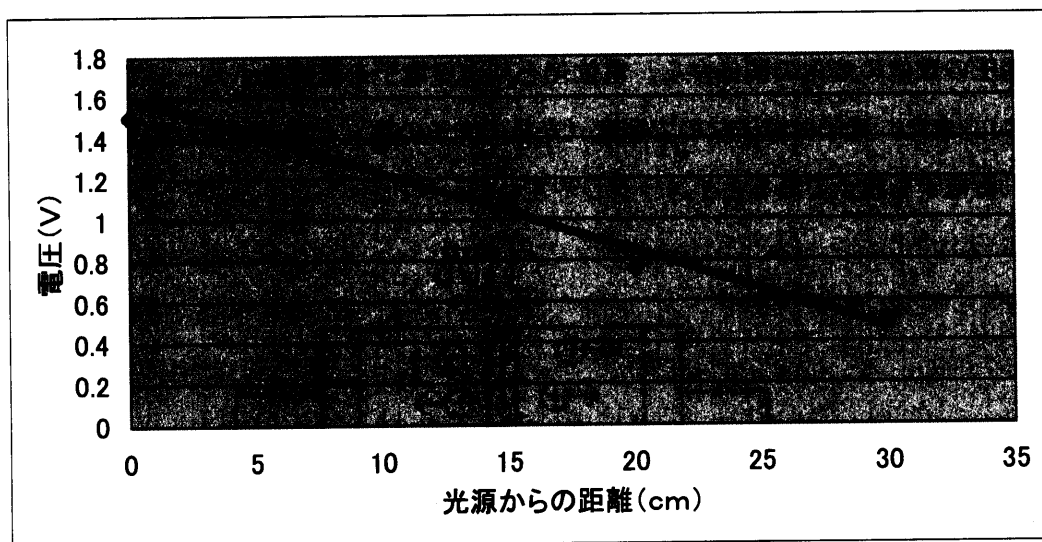


図4-14 光源からの距離と電圧（LED）

<考察>

図4-14より、照度と電圧の増減は比例関係にあることがわかる。すなわち光のエネルギー（光子の数）が小さければ、流れる電子の数も少ないということがわかる。

<実験4-⑥ LEDを電源に用いた実験>

実験4-2-I-①で述べたLEDの特徴を活かして、LEDにより電子オルゴール（動作電圧1.5V）を動作させる実験を行った^{8) 9)}。電圧を測定するだけでなく、オルゴールを動作させることにより、実際に電子が流れていることを実感させる。電子ブザーや豆電球などを動作させる実験も行ったが、比較的低電圧・低電流で動作するのは電子オルゴールであった。LEDを発光させる実験¹⁰⁾（図4-15）も行ったが、良くはれた日の太陽光を集光して実験をおこなっても光が弱く、黒い紙で発光側のLEDを覆ってもほとんど観察出来ない。これは内部抵抗の差によるものだと考えられる。また、電子オルゴールは、与えた電気量の変化によって音程が変化するので量的に捉えるのにも適している。実験は単純であるため、回路内の電子の動きを考えやすい。

本実験では回路内の電子の動きを単純にするため、受光用LED1つで実験を行えるよう凸レンズで集光したが、得られる電圧を大きくするためにはLEDを複数個つなげばよい（参考文献7）、8）では複数個使われている）。並列に接続した場合は大きな変化は得られないが直列に接続すれば大きな変化は得られる。凸レンズなどで集光せずに、太陽光に当てたときに、LED1つで約1.1Vの起電力が得られる赤色LEDを18個直列に接続すると約6.3V得られる。

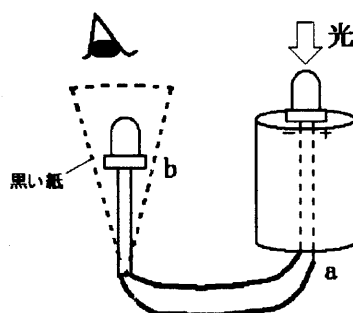


図4-15 LEDでLEDを発光させる実験の様子

a : 受光用LED

b : 発光用LED

＜実験方法＞

凸レンズを用いて太陽光をLEDのレンズ部分に集光する。このとき、光が垂直に入るようにLEDと凸レンズの位置や角度を調節する。凸レンズを用いて集光した光は、明るさだけでなく、熱も集約されていて危険である。そこで、LEDにフィルムケースの底面に穴を開けた台を付けて実験を行った（図4-16、4-17）。

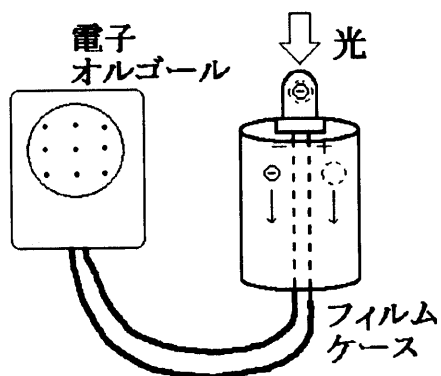


図4-16 光→電気の変換実験の装置

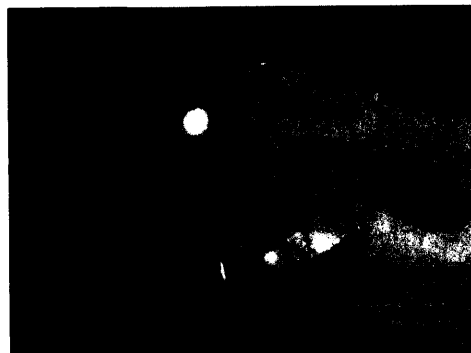


図4-17 実験の様子

＜結果＞

約1.64Vの電圧が得られ電子オルゴールが動作する。

＜考察＞

光エネルギー→電気エネルギーの変換が行われているLED内部では、図4-12のように光エネルギーにより電子が飛び出し、正の電荷を持った正孔（ホール）ができる。回路内では電氣的な中性条件を保とうとする働きが起こり、その結果として電子が流れる。

4-2-II 太陽電池を用いた実験

＜目的＞

太陽電池を応用した実験を行い、光と電子の動き及び量的関係について測定する。

＜実験4-⑦ 太陽電池を用いた実験－面積変化による電圧変化－＞

光エネルギーを電気エネルギーに変換する素子といえば、一般的には太陽電池が広く知られている。そこで、太陽電池を用いた教材実験として、光と発生する電気の量の関係を捉えるために、太陽電池の光を当てる面の面積を変化させ電圧を測定した。

<実験方法>

太陽電池（ヒシエス誠文社）[○]、光源、テスター（METEX 製、M-4660A）を用いて実験を行った。太陽光では天候に左右される。本実験では光の強さを一定にするため、光源に電気スタンドの蛍光灯（27W、MITSUBISHI 製、3波長形白色光）を用いた。用いた太陽電池は、図4-18のような数値を示すものである。面全てを使用して発電させたときの光源からの距離による得られた電圧の変化を図4-18に示す。

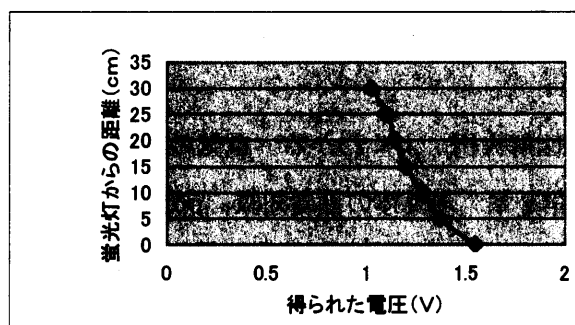


図4-18 光源からの距離と電圧（太陽電池）

太陽電池の全面に光を当てた場合、3分の1の面積を黒い紙で覆った場合（すなわち、発電に用いられる部分は3分の2）、3分の2の面積を黒い紙で覆った場合（すなわち、発電に用いられる部分は3分の1）の電圧変化を測定した。

<実験結果>

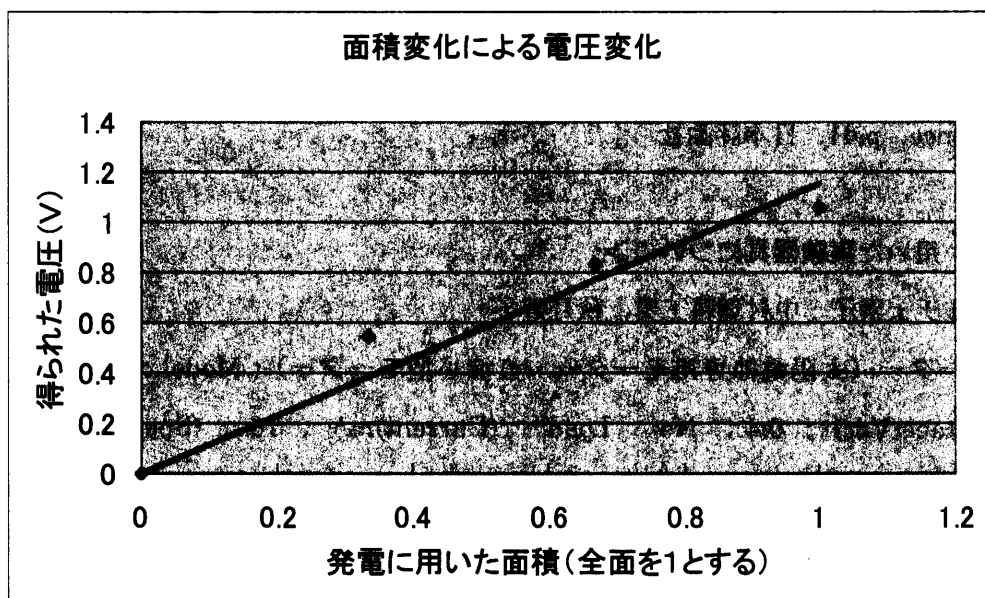


図4-19 太陽電池の受光面積を変化させたときの得られた電圧の変化

図4-19より、照度と電圧の増減は比例関係にあることがわかる。光のエネルギー（光子の数）が小さければ、回路に流れる電子の数も少ないということがわかる。

<4章 参考・引用文献>

- 1) 吉田卯三郎・武居文助、橘芳實、武居文雄、1979、六訂 物理学実験、p.238、三省堂
- 2) 齋藤安俊、1990、物質科学のための熱分析の基礎、p.37-41、共立出版
- 3) 小久見善八、2000、新世代工学シリーズ 電気化学、1. 3 電位の意味をつかもう、pp.163、オーム社
- 4) 藤瀧和弘、2004、図解入門 よくわかる 電気の基本としくみ 身近な機器からから学ぶ電気の基礎、第8章 半導体の基礎知識、pp.251、秀和システム
- 5) 酒井雅芳、1995、一イラストでー電気のことがわかる本、PART 1 電気の基本、pp.253、新星出版社
- 6) 三浦登ほか 24 名、平成 14.3.10 検定済、平成 16.1.20 印刷、平成 16.2.10 発行、物理 I、東京書籍
- 7) 愛知物理サークル・岐阜物理サークル、1988、いきいき物理わくわく実験、p.216-217、新生出版
- 8) 2002、理科実験大百科 4（少年写真新聞理科教育ニュース No.529）、p.23-24、少年写真新聞社
- 9) 福田務、2000、遊んで学ぼう 電気の自由研究、p.120-125、電気学会
- 10) 岐阜物理サークル（のらねこ学会）、2005、のらねこ先生の科学でいこう Let's enjoy Science、p.41、日本評論社

<4章 用いた実験器具について>

- a) ペルチェ素子：中村理科工業、秋月電子
- b) モーター（太陽電池専用モーター・直流小型モーター）：Model：H-151、Rated Voltage(Vdc)：0.4、No Load (Current)mA：16、(Speed)rpm：300、RatedLoad(load)g-cm：1、(Current)mA：27、(Speed)rpm：250、軸径：φ2.0
- c) 太陽電池（S型）：多結晶 シリコン太陽電池、解放電圧：1.7V、最適動作電圧 1.4V、短絡電流 450mA、最適動作電流 410mA、最大出力 0.57W（ヒシエス誠文社）

5 章 電子の動きを表すモデル

負の電荷（電子）の流れだけでなく、正の電荷も同時に取り扱い、回路内の電荷のバランスから電子の流れに注目したモデルを考えた。

教材実験では、電源部分に注目した回路内での電子の流れを意識させる実験を考えた。電源部分は電位差を与えるので重要な部分である。電位差とは、電子が流れる動力を与える動力を与えるもの、すなわち回路のバランスを崩す部分である。このバランスの崩れにより電子が流れるということ、4章の熱エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験と光エネルギーから電気エネルギーへの変換を扱う実験から学習する。バランスの崩れが重要であるという認識を持たせた後に、モデルを用いて回路全体の電荷のバランスについて考えさせる。

本研究では、電荷のバランスに注目した教材実験の開発と、電荷のバランスに注目したモデルを提案する。

2章でも述べたが、現在電流を表すモデルとして主流になっているのは水流モデルである。高校・中学校の教科書等にも多く用いられている。水流モデルとは電流を水の流れて表しているモデルである。本研究では、電子の粒子的な側面を捉えるため、また、正電荷と負電荷の両方のバランスに注目するために、水流モデルとは異なる考え方を提案する。すなわち回路において、電位差を与える電池（電源）では正極がプラスに、負極がマイナスに帯電している。回路内に電荷のバランスを崩す要因となる電池が存在すると、正電荷と負電荷のバランスを戻すために電子が流れる。以上の考え方を基本に、電子の動きを表すためのモデルを次に提案する。

5-1 押し出しモデル

電場によりエネルギーを与えられた電子に注目すると、回路内で1つの電子が回路の端から端まで動くのではなく、導線内につまった電子が順に押し出される、すなわちエネルギーが伝播することにより電子が流れるということを基本的な考え方とする。この様子を図5-3に模式的に表す。○は1つの電子を示す。このモデルでは、押し出す力が電圧を表しており、押し出された球の数が動いた電子の量（大きさ）を表している。これを「押し出しモデル」と呼ぶことにする。

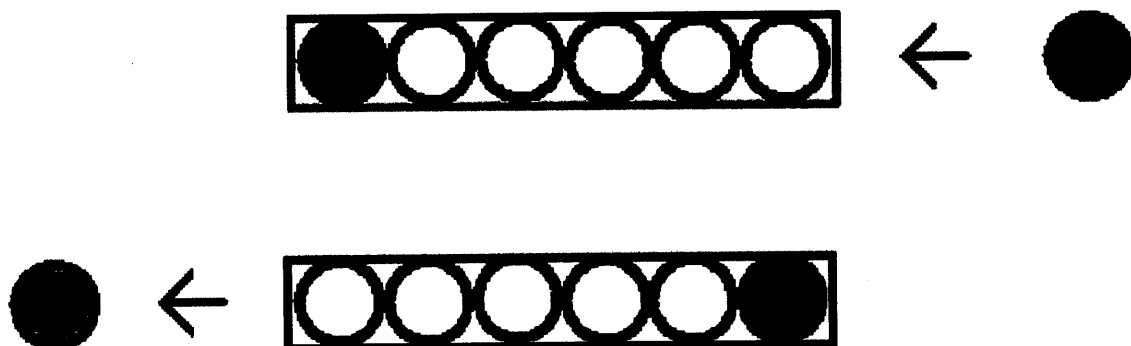


図 5 - 3 押し出しモデル
(球がひとつ入ると、球がひとつ押し出される)

5 - 2 数珠モデル

上記の「押し出しモデル」を基本的な考え方として、さらに発展させ「数珠モデル」を考えた。

導線内には非常にたくさんの電子がつまっていて、通常、電子（負電荷）と正電荷のバランスがとれている状態にある。電池などの直流電源が挿入されると、電荷の正負のバランスが崩れ、電子は動く。その動きの一部分をモデル化したものが「数珠モデル」である。形状が数珠に似ているため「数珠モデル」と名付けた。導線内には非常にたくさんの電子がつまっていて、電子が数個・数十個という状態はありえないが、数珠モデルでは、電子の動きを捉えやすくするため、その一部分を取り出してモデル化したものである。基本的なモデルは以下の通りである。

5 - 2 - I 電子（負電荷）・正電荷を表すモデル

図 5 - 4 のように電子を木製ビーズ^{a)}（直径 1.4 mm）、正電荷をストローで表す。木製ビーズの中心の穴を通る大きさのストローを使用し、長さは木製ビーズに合わせてカットしておく。これは、図 5 - 5 のように正電荷と電子が打ち消しあっている状態を、木製ビーズにストローを通した状態で表すためである。

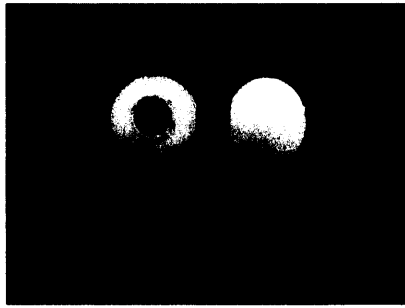


図 5-4 正電荷・負電荷のモデル

a : 正電荷 b : 負電荷

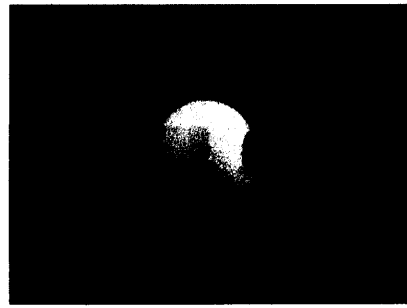


図 5-5

正電荷・負電荷のバランスがとれた状態

5-2-II 導線を表すモデル

導線内では、回路に組み込まれていない通常状態において、正電荷・負電荷（電子）ともに同量存在し、電気的なバランスが保たれている（図 5-6）。本研究では、電子の動きに注目しているため、動きがよく分かるように、図 5-6 の状態から図 5-7 のように縮めたものを導線のモデルとして使用する。図 5-7 の状態では、表面上、正電荷を表すストローは見えないが、負電荷（電子）を表す木製ビーズの内側にある。

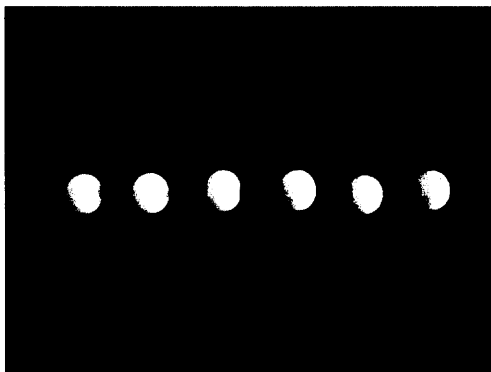


図 5-6 導線モデル①

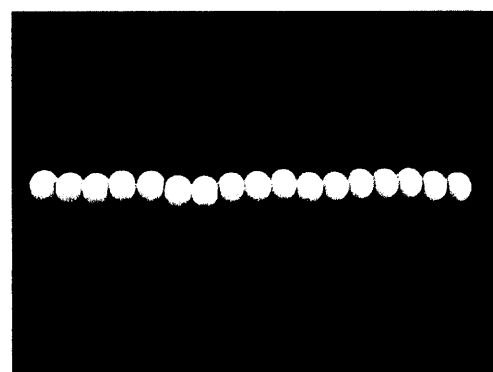


図 5-7 導線モデル②

5-2-III 電源を表すモデル

電源部分に関しては、当初、“電位差をイメージさせるモデル”（脚注参照）として高低差のあるモデルを考えたが、本研究では回路内における、電子と正電荷のバランスについて注目しているため、高低差を設けずに、電子と正電荷のバランスに注目したモデルを考えた（図 5-8）。図 5-8 のように、電源部分の外装にはフィルムケースを使用し、電池に見立てた。電池の正極は+に帯電し、負極は-に帯電している。この負電荷（電子）・

正電荷のかたよりを負電荷（電子）を表す木製ビーズと正電荷を表すストロー（図5-4、5-5）を用いて表現した。



図5-8 電源（電池）のモデル

（脚注）“電位差をイメージさせるモデル”について

電源部分のモデル化の際、当初、上記のモデル以外に図5-9、5-10の様なモデルも考えた。

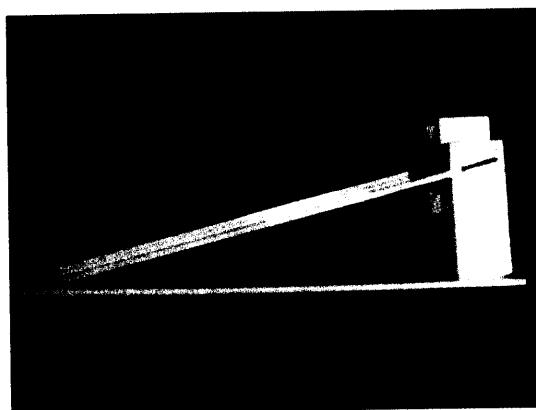


図5-9 高低差モデル（横方向）

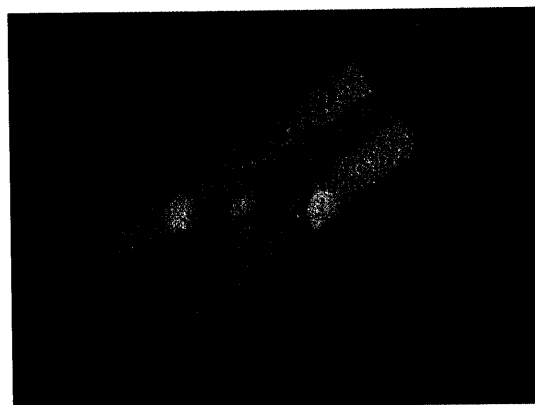


図5-10 高低差モデル（斜め上）

このモデルは電位差の大きい・小さいという状態を実際にモデルの高低差を用いて表したものである。本研究では、電子に注目しているため電子のエネルギーが大きい方、すなわち負極をモデルの高い方で示した。負極側、すなわちモデルにおける高い方には歯車（フィルムケースのふたの縁に約1×1cmの金属板を差し込んだ）をとりつけてあり、それに竹串を通してある。その竹串を回すと歯車が回り、電子が押し出される仕組みになっている（図5-11、5-12）。

このモデルは、電源部分のみに注目した場合にはよいが、数珠状の回路を考える際、木

の球は平面状に並ぶ。しかし、この高低差モデルでは球を送り出す部分となる電源部分が平面上の回路に対して垂直に球を押し出すので球がなめらかに動かないという理由から、回路全体の動きを考える際に不便な点があり、回路内に組み込む事を断念した。

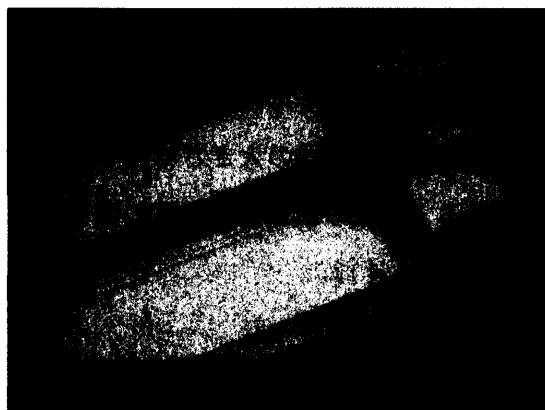


図 5 - 1 1

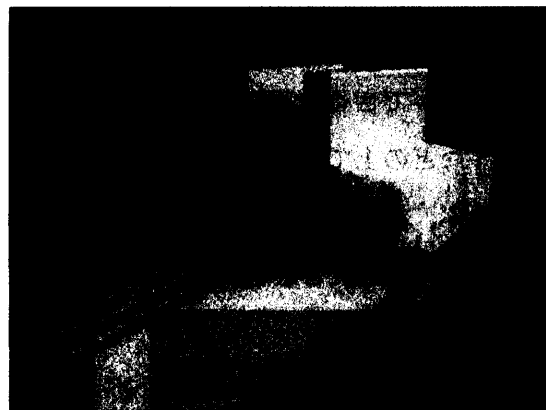


図 5 - 1 2

高低差モデルに導線モデルを組み込んだ様子

高低差モデルを動作させている様子

5 - 2 - IV 抵抗を表すモデル

回路内における電気抵抗は「数珠モデル」では、木製の球が動く際に受ける摩擦の大きさを表した。数珠モデルでは木製の球を動かし、それを電子の動きと見なす。球を動かす際の摩擦を変えることで電気抵抗の大小を表した。

表 5 - 1 金属の抵抗率¹⁾

金属	抵抗率 $\times 10^{-2} [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$
銀	1.62
軟銅	1.71
硬銅	1.76
金	2.40
アルミニウム	2.62
タングステン	5.48
亜鉛	6.10
鉄	10.00
白金	10.50
ニクロム線	約 100

1) 物質による抵抗値の変化を表すモデルについて

物質により、電気抵抗値は異なる（表 5-1）。これは木製の球が受ける摩擦の大きさを調節することで表現した。図 5-13 のように半分に切ったゴムホースや、図 5-14 のように液体ゴム^{b)}（乾けばゴムになる。色付きの物を利用すると、見た目の濃さで摩擦の大小の判別ができるので使いやすい）を塗った電気配線を保護するためのレールやカーテンレールなどの上で球を動かす。ゴムホースやレールは使用する球の大きさに合った幅のものを選ぶ。液体ゴムは薄めても使用でき、薄めて塗る・原液のまま塗る・重ね塗りをするなどして摩擦の大きさを調節することができる（図 5-14）。

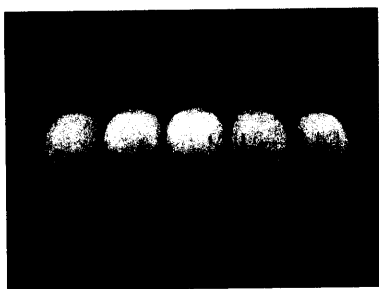


図 5-13 抵抗モデル①

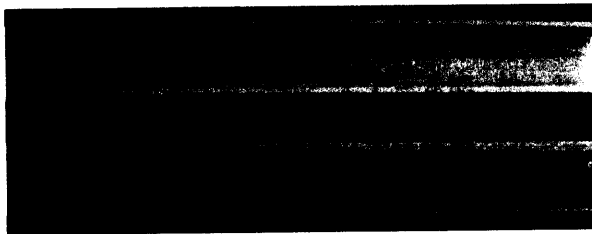


図 5-14 抵抗モデル② 摩擦の大小

2) 長さの変化による抵抗値の変化を表すモデルについて

導線は長さが増えると抵抗値も変化する。実際に導線（ $\phi 0.35\text{mm}$ 、表面をエナメルコーティングした導線）を用意した（図 5-15）。10m、20m、30m、40m、50m、60m、70m、80m の場合の抵抗値の変化をテスター（METEX 製、M-4660A）で測定してみた。



図 5-15 長さによる抵抗値の変化を測定するための導線

結果は以下の通り、導線の長さと抵抗値は比例関係を示す（図 5-16）。

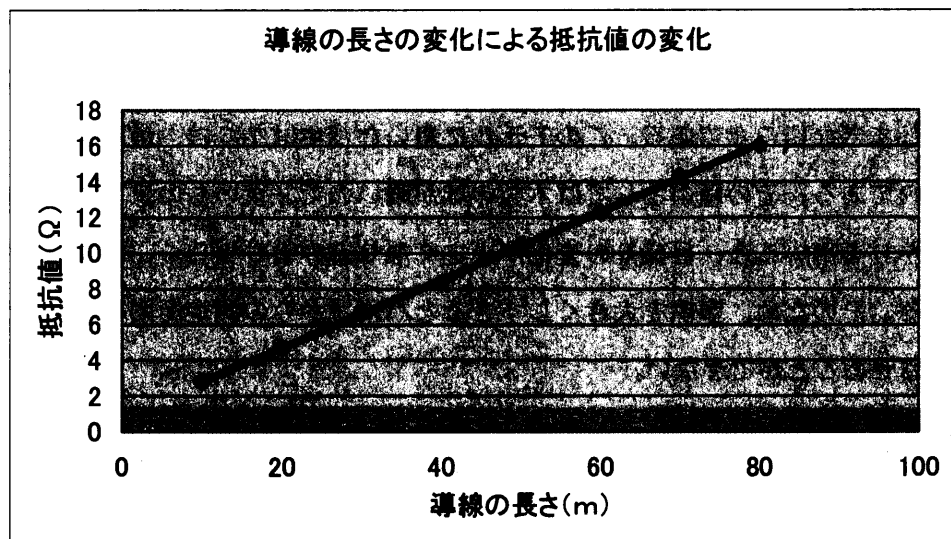


図 5-16 抵抗値の変化

この結果を説明するためモデル化した様子を以下に示す。導線に見立て、木製の球をつなげる長さを変化させる（図 5-17）。バネばかりを用いて抵抗値を摩擦として測定するので、クリップを用いて（クリップを留め具にし、片方の頭を出しておく）バネばかりのフックをかけることが出来るようにした（図 5-18）。

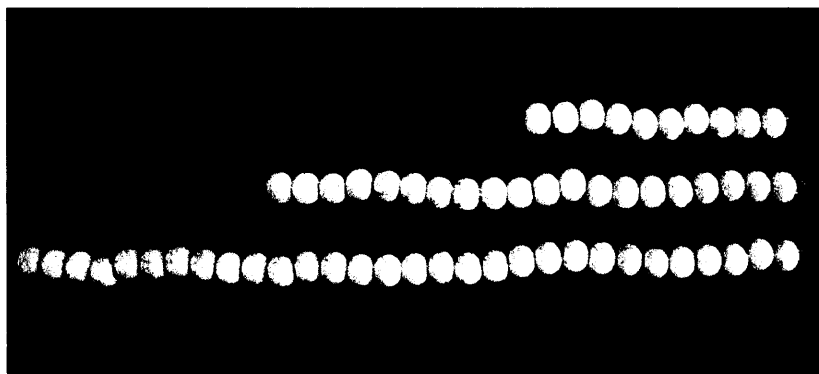


図 5-17 長さが異なる（1：2：3）の導線モデル

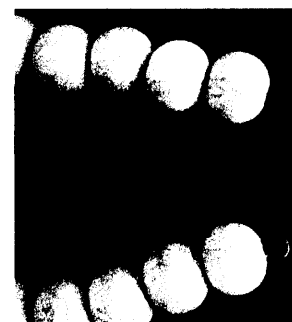


図 5-18

バネばかりのフックを
引っかける部分

バネばかりのフックを球のクリップにかけ引く。球が動き出してから、動摩擦係数を測定するためバネばかりの目盛りを読みとる（図 5-19）。木製の球をつないだ長さは 1：2：3 である。この変化に伴い、バネばかりの目盛りの値も 1：2：3 となる。球の長さが導線の長さの違いに相当する。レールとの摩擦による抵抗が、導線内部における（格子振動などの）抵抗に相当する。また、同じ長さでも導線の材質が異なれば抵抗値も異なる

ことを表すため、レールに抵抗が大きくなるように手を加える事も可能であり、抵抗値も変化させることが出来る。ただし、このモデルをうまく動作させるためには、あまり摩擦を大きくしすぎないことである。このモデルに用いたバネばかりは、最高で50gまではかれるものである。その理由としては木製の球が軽いので、重いものまで測ることのできるバネばかりを用いると、目盛りの変化が小さくなり読みとりづらく、誤差も大きくなるためである。そのため、摩擦を大きくしすぎるとバネばかりの測定範囲を超えモデルをうまく動作させることができない。

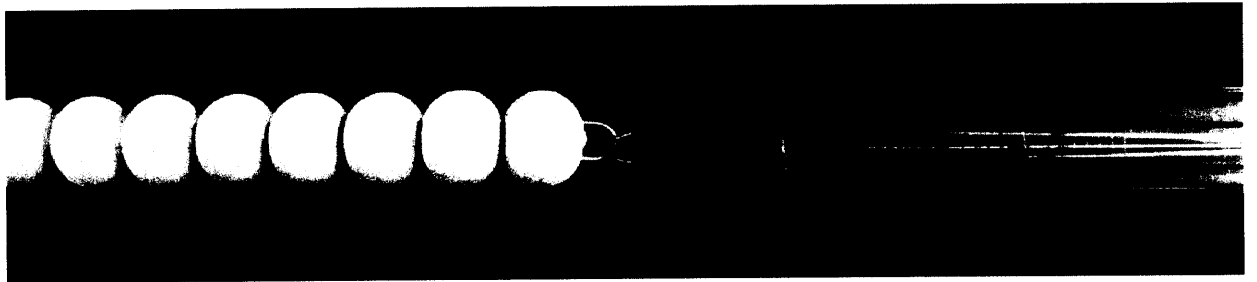


図5-19 測定の様子

3) 断面積の変化による抵抗値の変化を表すモデルについて

同じ物質でも断面積が大きくなれば、抵抗値は小さくなる。このことをモデル化したものを以下に示す。

厚さ5mmの発泡スチロール板を用いて、幅の異なる3本のレールを作製した。このレールの幅の違いが、導線の断面積の違いに相当する(図5-20)。本実験ではレールの幅が1:1.5:2と1:2:3になるように2種類のモデルを作製し、検証した。どちらも、同じような結果が得られたが、レール幅が1:1.5:2のモデルはレール内での引っかかりが多く見られたため教材として用いるモデルとしては不適用であった。このことから、レール幅が1:2:3のモデルを用いて実験を行った。球がそれぞれのレールから出てきたのかを区別するため、色の異なる球(電子のモデル)をそれぞれのレールに並べる(図5-21)。

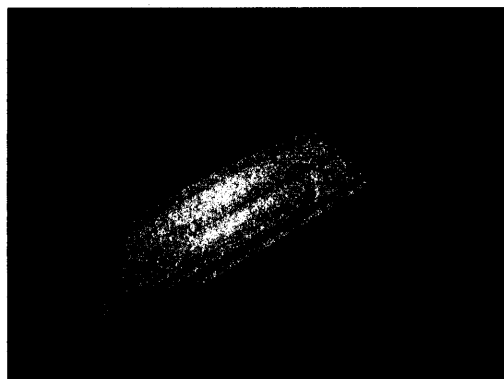


図 5-20 断面積変化による抵抗値の変化を表すモデル

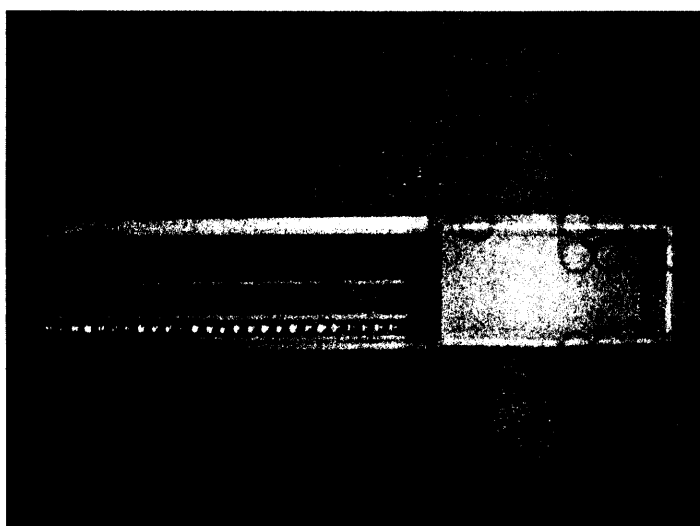


図 5-21 モデルに球を並べた様子

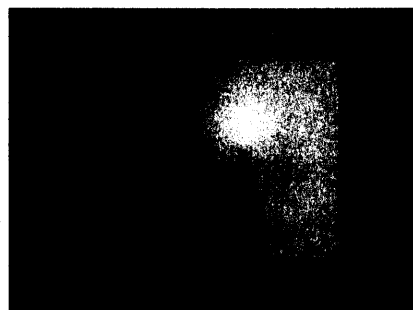


図 5-22 ストッパー

一斉に球が押し出されるようにするため、レールと球をためる部分（図 5-21 の右側の四角い部分）との間にすきまを作っておき、ストッパー（図 5-22、アクリルの板や下敷きなどを適当な大きさに切る）を差し込んでおく。ストッパーを上にはずらすと、球が一斉に押し出される。適当なところでストッパーを戻す（図 5-23）。

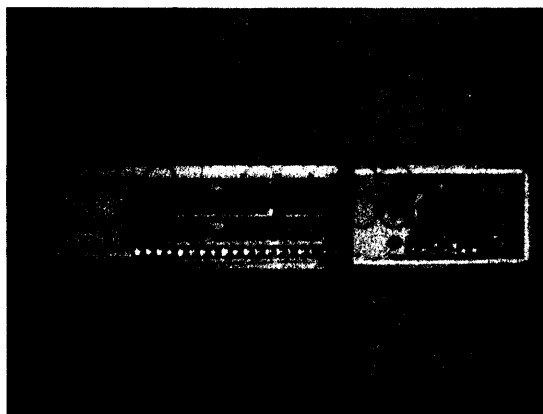


図 5-23 モデルを動作させた時の様子

各レールから出てきた球の数は、色の違いから知ることができる。この球の数の違いが、電子の量の違いに相当する。

5-2-V コンデンサー

コンデンサーの主な機能である充電と放電について、電子の動きに注目してモデル化を行った。

1) 充電

コンデンサーの通常状態をの図5-24で表す。○が電子を表す。 充電のための電源を挿入する(図5-25)。

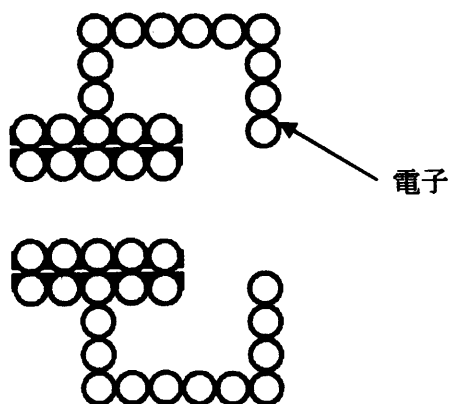


図5-24 コンデンサー—通常状態

電源部分の正負に電子が引きつけられ、そのことにより電源部分の正負のバランスがくずれ電子が押し出される。このことを繰り返し充電が行われる(図5-26、5-27)。

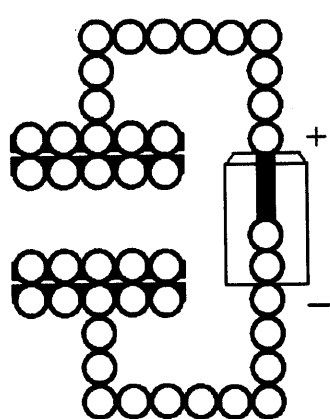


図5-25

電源挿入(充電開始)

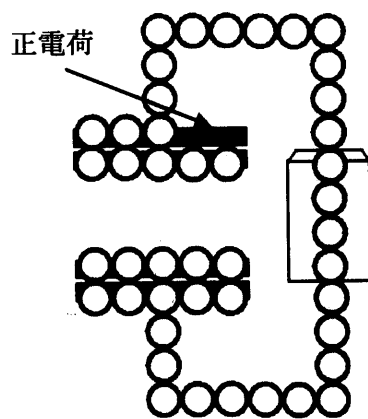


図5-26

充電中①

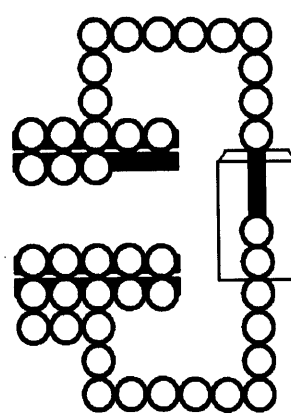


図5-27

充電中②

充電開始の状態から充電中①の状態→充電中②の状態と電子が押し出されていく。電子の移動が終了し、充電が完了。この時、コンデンサの両極はそれぞれ正極・負極にわかれ、バランスが崩れた状態である（図5-28）。

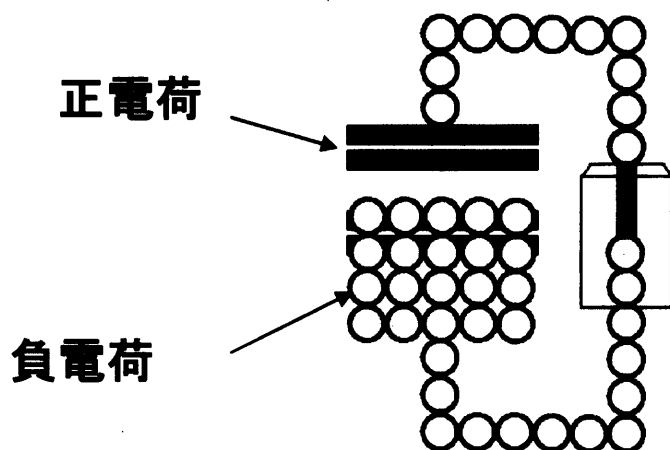


図5-28 充電完了（正・負に帯電）

2) 放電

上記の充電完了の状態のときに動作させたい素子を挿入する（図5-29）。正負のバランスを戻すために電子が動く（図5-30）。

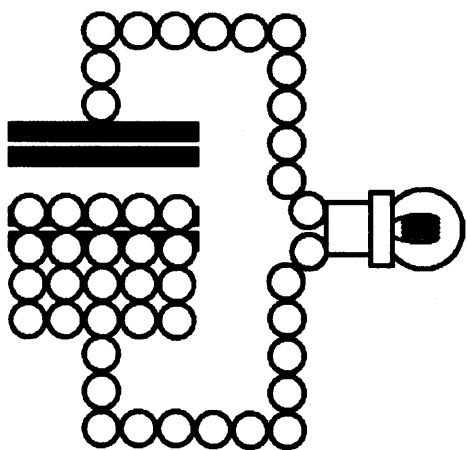


図5-29

動作させたい器具を挿入

（豆電球の場合：点灯）

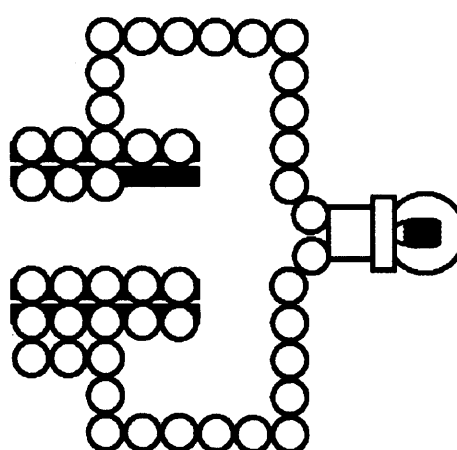


図5-30

バランスを戻すために電子は動く

（豆電球等は点灯）

バランスが平衡状態に戻ると、動作は終了する（図5-31）。

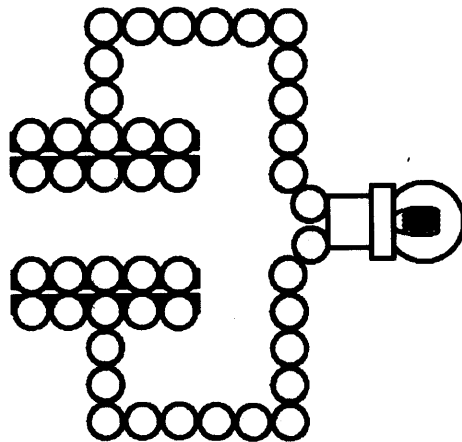


図 5-3 1 バランスの崩れがなくなる（豆電球等は消灯）

5-2-VI 回路

5-1、5-2-I～5-2-Vで紹介してきた内容を用いて、回路内での電子の動きをモデル化した。

1) 回路内における電池と抵抗の関係

基本的な考え方として、回路内における電池と抵抗の関係について説明する²⁾。通常電池（電源）の正極は正に負極は負に帯電し、導線は内部で正・負のバランスがとれた状態で存在している（図 5-3 2）。

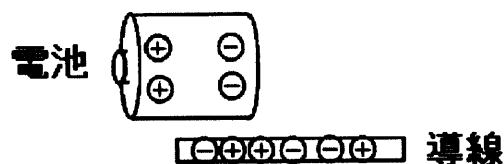


図 5-3 2 電池と導線

電池に導線をつなぐと、電子が正極側では引き寄せられ、負極側では反発し電気的なバランスの崩れが起こる（図 5-3 3）²⁾。

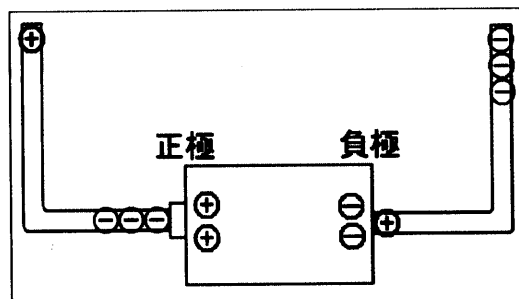


図 5-3 3 電池に導線を接続した時の考え方を表すモデル²⁾

動作させたいものを挿入すると、バランスの崩れを戻すために、電子が流れる（図 5 - 3 4）。

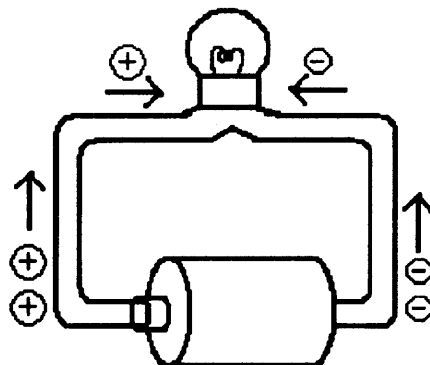


図 5 - 3 4 回路形成で+と-のバランスを戻そうとする様子

2) 回路内における電子の動きの考え方—モデル—

上記の“回路内における電池と抵抗の関係”をモデルで表すと以下の様になる。

導線を表すモデルに電池（電源）を表すモデルを接続（図 5 - 3 5）する。電池内部では正極は正に負極は負に帯電している。電池の正極の正電荷により、導線の負電荷（電子）が電池内部に引き寄せられる。これにより、電池内部の正負のバランスが崩れる（図 5 - 3 6）。

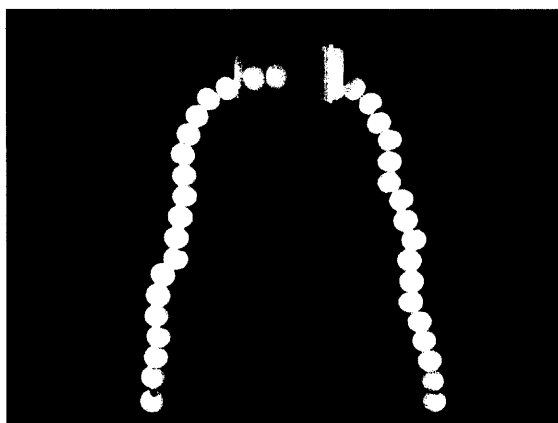


図 5 - 3 5
電池に導線を接続

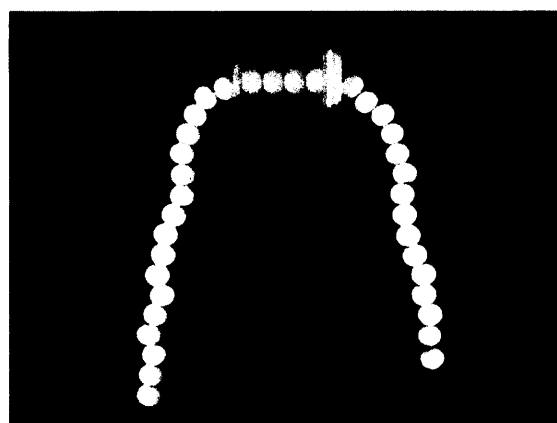


図 5 - 3 6
電池内部の正電荷に
負電荷（電子）が引き寄せられる

電池内部の正負のバランスを元に戻すために、電子が押し出される。この押し出す力が電圧と考える。一度に押し出す球の数が多いほど、電圧が大きいことを表している。また、

この時に押し出される球の数の大小が流れる電子の量の大小に相当する。電子が押し出されたことによりバランスが崩れ、正極側の導線は正に、負極側の導線は負に帯電する（図 5-37）。

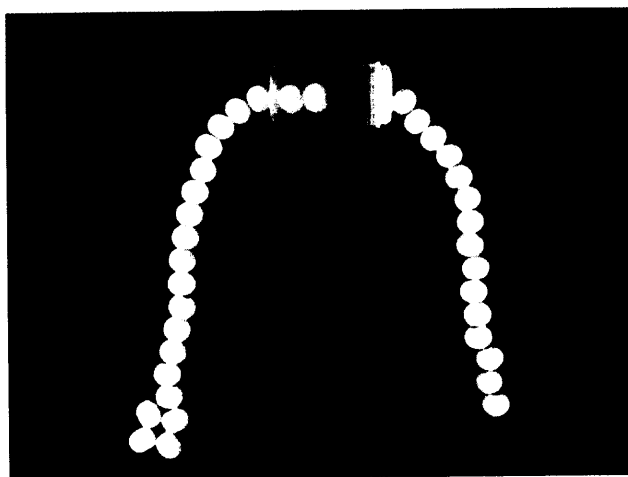


図 5-37 電池内部のバランスを保つために電子が押し出される

この状態からさらに、動作させたいもの（抵抗）を挿入し、回路を形成する。導線の正電荷と負電荷のバランスを元に戻そうとして、電子が流れる（図 5-38）。

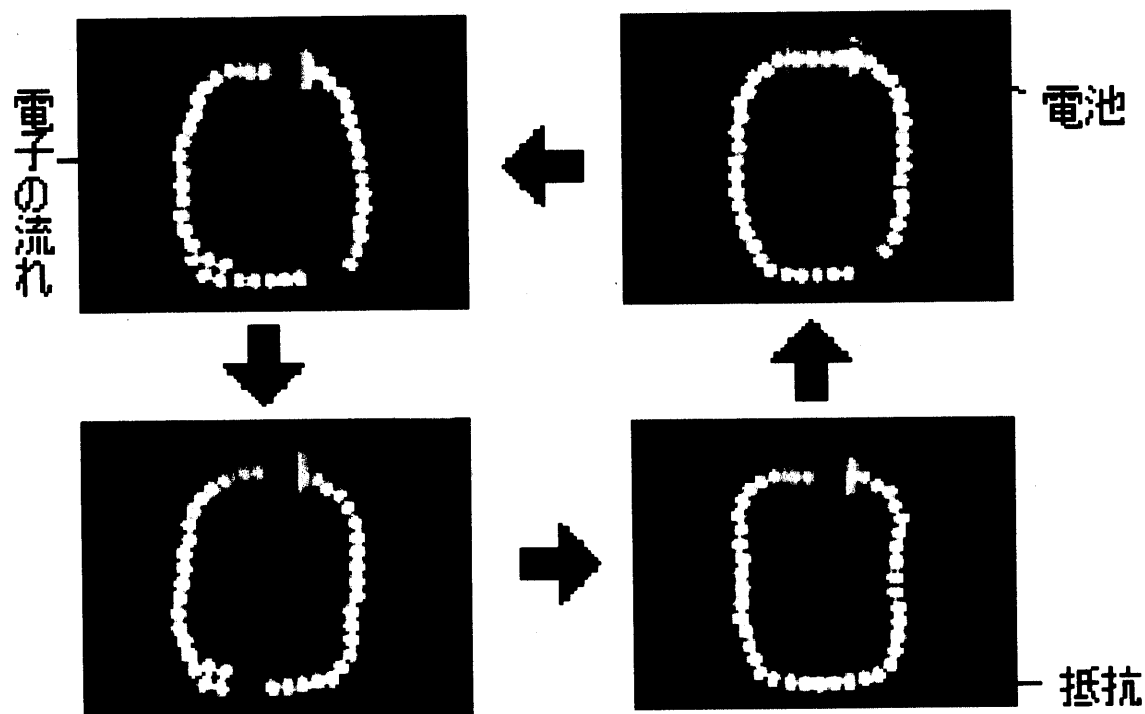


図 5-38 回路形成

図 5-38 の左上の図は図 5-37 の状態に動作させたいもの（抵抗）を挿入した状態

である。回路内の電荷のバランス（図5-39）を戻そうとして、正電荷に引きつけられ負電荷（電子）は動く。回路内では導線や抵抗内部の電荷のバランスを戻すために電子は動く。しかし、その一方で電源が回路内の電荷のバランスを崩すということが起こっており、電源が働き続けるかぎり電子は流れ続ける。

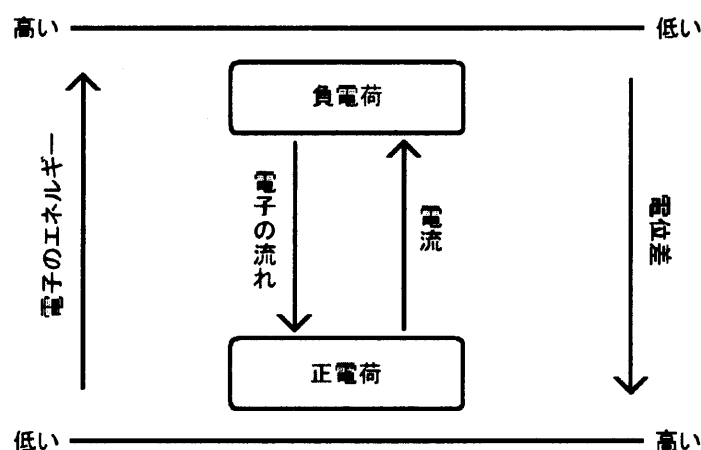


図5-39 電子のエネルギーの高低³⁾

5-3 カリキュラムとの関わり

現行の理科において、回路学習は小学校・中学校・高校のすべてに登場している。小学校理科では3年生、4年生、6年生、中学校理科では1分野（上）、高校では主に物理分野や化学分野で用いられている。本研究の対象は高校物理であるが、他の校種等との関わりについても述べる。

小学校理科では、3年生で初めて回路学習が登場してくる。主題名は「豆電球にあかりをつけよう」⁴⁾や「電気であかりをつけよう」⁵⁾などで、主な内容は、回路が輪になって途切れていないこと・電気を通すもの通さないものである。4年生では、乾電池のつなぎ方や光電池の働き学習し、6年生になると電磁石の働きと性質を学習する。

中学校理科⁶⁾では、静電気、回路、電流の流れる向き、回路を流れる電流、回路のいろいろな区間の電圧、電流と電圧の関係（電気抵抗とオームの法則、金属の種類と抵抗、オームの法則と直列・並列回路）、電気の利用などについて学習する。

小学校理科で学習する電気を通すもの通さないものに関しては、数珠モデルで表されている球、すなわち自由電子を持っている物質と持っていない物質があることは説明は可能かもしれない。しかし、電子という概念自体を持たない小学生に、自由電子の概念を教え

ることは難しい。自由電子を持つ、持たないということが、電子自体を持つ、持たないという間違っ了解釈につながる可能性もある。また、高校物理にも共通して言えることだが、電磁石やコイルの概念に関して、電場の及ぼす影響や磁石による影響を、数珠モデルを用いて表すと電荷の動き（正電荷、負電荷共に）が複雑になる。手作業で動作させる数珠モデルでは、正確に表すことが困難だといえる。

小学校・中学校に共通して言えることは電気の通る道筋、すなわち回路が輪になっているという内容である。この内容に関しては数珠モデルを用いて、回路が輪になっていなければ電子の移動が起こらない（途切れる）と説明することが可能である。また、図5-40、5-41のように電池を直列につないだ場合の押し出す力（すなわち電圧）についても考えることが可能である。回路における、直列の際の電流一定、並列の際の電流分配についても電源から押し出される球（電子）の数が常に一定（回路によって電源の大きさは決まっているため、押し出す力は一定）であるということから説明が可能である。直列回路の場合は抵抗モデルでも示したが、電子が通りにくい（数珠モデルでは摩擦）だけで、電子がなくなるわけではない。一本の回路上にある場合は常に電源から流れ込む電子と同量の電子が、回路内で押し出されながら動いていることになるため、電流（電子の動く量）は一定（図5-42）。また、並列回路の際の説明は、押し出す力が一定、すなわち押し出される球の数が一定である。回路が並列になっても、電源（電池は）数値を変えない限りは一定の力で電子を押し出す。回路の途中で、通り道（導線）が分かれた場合、押し出されてくる球を分かれた道筋に分配しなければならない（図4）。

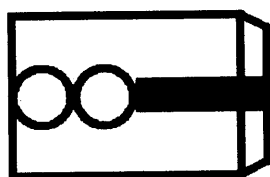


図5-40 電池1個

押し出す力：2

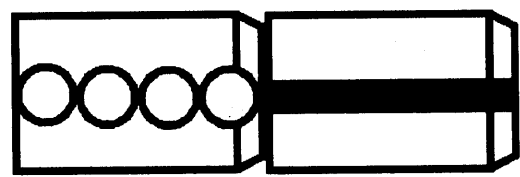


図5-41 電池2個直列つなぎ

押し出す力：4



図5-42 直列回路

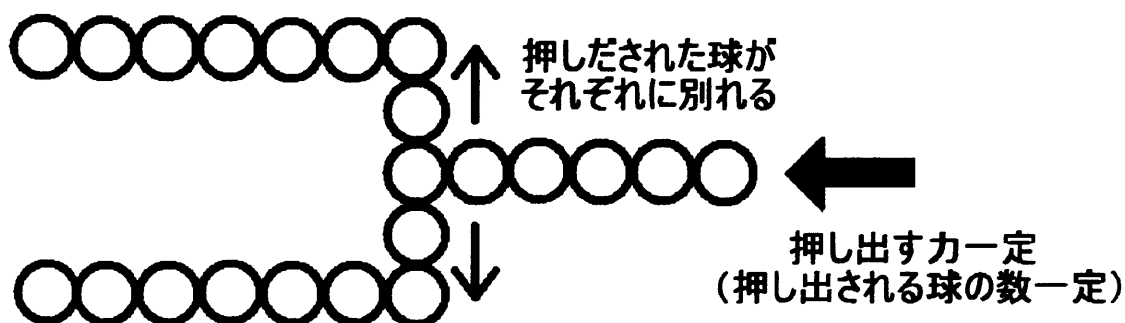


図 5 - 4 3 並列回路

中学校理科における静電気の学習に関しても、正電荷と負電荷のモデルを用いて、電荷のバランスを説明することは可能である（6章 授業実践参考）。

以上のことから、高校だけでなく小学校・中学校理科への応用も可能であると考えられるが、先述した電磁石の性質を説明できないことや自由電子に関する語概念を持ちかねないという点から、教師側が判断し、使い分けが必要であると考えられる。

また、中学校理科と高校理科の共通内容として、“金属の種類と抵抗”があるが、この点のモデル化に関しては先に述べた通りであり、対応可能であると考えられる。

高校理科では、主に物理分野における内容を中心に研究を行った。コンデンサーの機能の学習への応用は言うまでもないが、電流についての学習への応用も可能である。高校物理において電流は導体を流れる電流の大きさ I [A] は、ある断面積を単位時間に通過する電荷の量、すなわち $I = e n S v$ ⁷⁾ (e [C]: 電荷、 n [$1/m^3$]: 単位体積あたりの自由電子の個数、 S [m^2]: 断面積、 v [m/s]: 自由電子の平均の早さ) と定義されている。また、電流の定義を表す際の説明には図 5 のような図が用いられている。この電流の定義の式を用いた計算問題などが、学習内容に組み込まれている。その中には自由電子の移動速度を求める問いも存在する。実際に理論値を計算してみる⁷⁾。断面積 $1.0mm^2$ の導線に $1.0A$ の電流が流れている場合、銅 $1m^3$ 中には 8.5×10^{28} 個の銅原子が含まれる。銅原子 1 個が自由電子 1 個を放出するものと仮定すると、導線には単位体積あたり 8.5×10^{28} 個の自由電子が存在することになる。これらの数値を $I = e n S v$ に代入し計算すると、 v は約 7.4×10^{-5} [m/s] となる。すなわち 1 s 間にわずか $0.074mm$ しか進まないことがわかり、自由電子の移動速度は決して速いとは言えない。図 5 - 4 4 のような書き方では、1 つの自由電子が回路の端から端まで移動しているような印象を受けるが、それでは計算結果と実際の回路を形成してスイッチを入れたと一瞬で動作するという現象を

照らし合わせたときに説明がつかない。数珠モデルでは、1つの自由電子が回路の端から端まで移動しているのではなく、回路内につまっている（自由）電子が押し出されるのだということを、基本的な考え方とした。数珠モデルを用いて説明すれば、自由電子の速度についても説明が可能となる。また、数珠モデルは、正電荷と負電荷の両方の動きに注目しているため半導体における電子の振る舞いや、高校化学における電池や電気分解も一種の回路学習であり、それらへの応用も可能であると考えられる。しかし、先ほども述べたが電磁石やコイルに関して電場の及ぼす影響や磁石による影響を表すことが困難であるという課題も残っている。

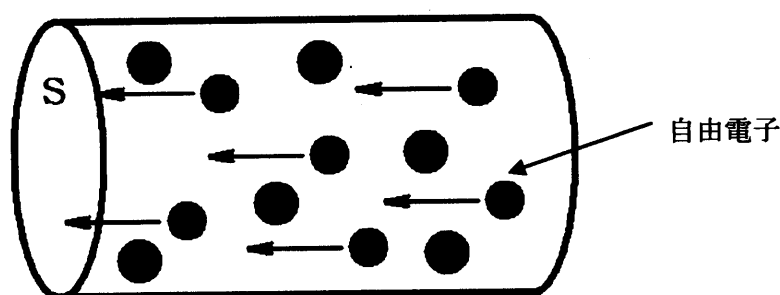


図 5 - 4 4 金属導線中の移動電子⁸⁾

<5章 参考・引用文献>

- 1) 古川修文、1981、誰にもわかる やさしい電気の一般知識、1 電気とは何か、pp.222、新星出版社
- 2) 酒井雅芳、1995、一イラストで一電気のことがわかる本、PART 1 電気の基本、pp.253、新星出版社
- 3) 小久見善八、2000、新世代工学シリーズ 電気化学、1. 3 電位の意味をつかもう、pp.163、オーム社
- 4) 戸田盛和ほか 49 名、平成 16.2.10 検定済、新版楽しい理科 3、大日本図書
- 5) 大隈良典・石浦章一・鎌田正裕ほか 37 名、平成 16.2.10 検定済、平成 17.2.1 印刷、平成 17.2.10 発行、わくわく理科 3、啓林館
- 6) 戸田盛和ほか 47 名、平成 13.2.28 検定済、平成 14.2.1 初版印刷、平成 14.2.5 初版発行、理科 1 分野上、大日本図書
- 7) 三浦登ほか 24 名、平成 14.3.10 検定済、平成 16.1.20 印刷、平成 16.2.10 発行、物理 I、東京書籍

- 8) 中村英二ほか 21 名、平成 15.3.10 検定済、平成 18.2.1 日印刷、平成 18.2.10 発行、高等学校物理Ⅱ、第一学習社

＜5 章 用いた実験器具について＞

a) ウッドビーズ

MAZZ09 14mm丸型 (マクラメビーズ製)

b) 液体ゴムBE-2

品番 BE2-2 色 イエロー (ユタカメイク製)

6章 授業実践

6-1 授業実践について

本研究は、高校物理において回路内での電子の動きを捉えるための教材実験やモデル化を提案した。先にも述べたが高校理科では電子について物理・化学の分野によるとらえ方の違いが起こっている。まず、高校の前段階である中学校理科ではどのような学習展開がされているかを調べる（付録参照）。電気回路の導入の部分で静電気の学習を行い、その後回路（電流）の学習へと展開していく流れになっている。静電気の説明の部分では、各教科書会社、－（マイナス）の電気の粒が移動するために静電気は起こると説明されている。発展的なトピックスとして、電子という言葉を紹介している教科書もある（付録参照）。しかし、回路（電流）の学習になった途端に、この－の電気の存在は記されなくなる。

そこで、中学校理科での電気回路の学習を電子の概念を用いて行うことを検討するために授業実践を行った。今回行った授業実践の目的の中で、特に重要な部分は電気の正体が電子であること、及び静電気と動電気の正体は同じであるという点である。これらの点は今後回路学習の中で数珠モデルを導入する際に必要な概念である、電子によって電気伝導は起こる、“回路内における電池と抵抗の関係”（5章参照）を理解する上で重要な部分である。帯電現象を電子を用いた考え方で理解すること、また静電気と動電気はどちらも電子が原因であることを理解することが、5-2-VIで述べた“回路内における電池と抵抗の関係”の概念へとつながる。また、回路に関する理解の現状や授業実践による理解度の変化を確認するためにアンケートも行った。

<対象>

京都教育大学附属京都中学校「京中サイエンス」（選択授業）のクラス、生徒数39名、内3年生は男子2名、女子14名の計16名、2年生は男子13名、女子10名の計23名を対象に授業実践を行った。

<授業時間>

50分×2コマの計100分

<教材>

電子の存在を理解するための題材として、静電気を選んだ。先にも述べたが、静電気を選んだ理由としては、中学校理科の教科書（付録参照）では、電気分野の導入として静電気が用いられていること、また静電気の起こる仕組みについて電子を、－（マイナス）の

電気の粒と表現して用いていることがあげられる。また、教科書（付録参照）によっては、発展的なトピックスとして、電子という用語を登場させているものもある（教育出版、学校図書、大日本図書など）。なかには、平成17年度に新たに検定された教科書から、電子という用語を登場させている出版社もある（大日本図書など）。このことから電子の概念が重要であると考えられる。

電子の概念により、静電気の正体と動電気の正体と同じであることを理解させ、回路の学習へと発展させることが可能である。

授業の展開を以下のように組み立てた。

- ① 摩擦による静電気の発生
- ② 帯電シャボン玉を用いて電気の種類（＋、－の極性）や静電気の仕組みについて
- ③ 電気の中和現象から電気のバランスについて
- ④ ネオン管とアルミカップコンデンサーを用いた実験から静電気と動電気の正体と同じであることを学ぶ

<授業実践で行った実験について>

【1】摩擦による静電気の発生（生徒実験）

静電気を起こし、反発・引きつけ合いを観察することから、静電気には二種類の電気があることに気づかせるために行う。

1) 実験道具

ストロー、ティッシュペーパー、ナイロンテープ、ビニル袋

その他、髪の毛、下敷き、セーターなど身の回りにあるもの

2) 実験方法

上に示した実験道具を用いてこすり合わせることで、静電気を発生させた。静電気による反発・引きつけ合いを観察しやすくするためにストローの端の方に穴を開け、そこに伸ばしたクリップを差し込んだ（図6-1、6-2）。

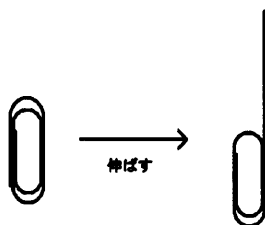


図6-1 クリップの伸ばし方

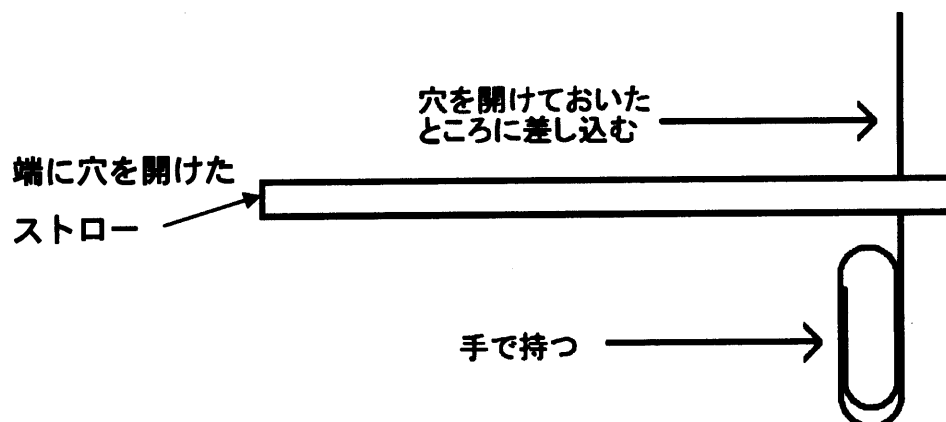


図6-2 ストローに差し込む

【2】帯電シャボン玉（演示実験）

摩擦による静電気の発生で観察した反発・引きつけ合いを確認するために行う。また、シャボン玉を帯電させる方法として、摩擦で発生した静電気を移し帯電させる方法¹⁾と直流電源を用いて帯電させる方法²⁾の2種類で行った。これは、静電気により発生した電気と直流電源により発生した電気が同じものであるということを実感させるためである。

1) 実験道具

- ・塩ビパイプ（使いやすい長さに切る、約30～35cm程度）
- ・毛糸（羊毛100%、摩擦しやすいように編む）
- ・ストロー
- ・アルミ箔
- ・セロハンテープ
- ・みのむしクリップ
- ・シャボン液¹⁾（砂糖約50g、湯水約100ml、洗剤2～3cm³）
- ・直流電源

2) 実験方法

①塩ビパイプを羊毛で摩擦し帯電させる（図6-3、6-4）。



図6-3 塩ビパイプ



図6-4 毛糸（羊毛100%）

- ②帯電した塩ビパイプで、アルミ箔を巻いたストローのベロにふれながらシャボン玉を膨らませ、できたシャボン玉を帯電させる（図6-5）。

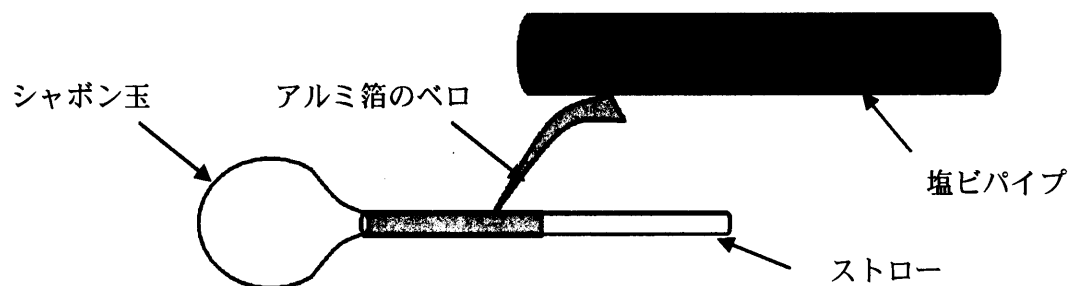


図6-5 シャボン玉に静電気を移す

- ③シャボン玉は塩ビパイプと同じ負に帯電しているので、塩ビパイプ及びシャボン玉を膨らませたストローにも反発する。また、手を近づけると負に帯電しているので、手の表面で静電誘導が起こり、手のシャボン玉に近い側は正に帯電するので、シャボン玉は手に引き寄せられる。

- ④アルミ箔を巻いたストローのベロに直流電源の+を接続する（-はアースしておく）（図6-6）。この状態でシャボン玉を膨らませるとシャボン玉は正に帯電する。摩擦して帯電させた塩ビパイプを近づけると、シャボン玉は引き付けられる。塩ビパイプが負に帯電していることが分かる。

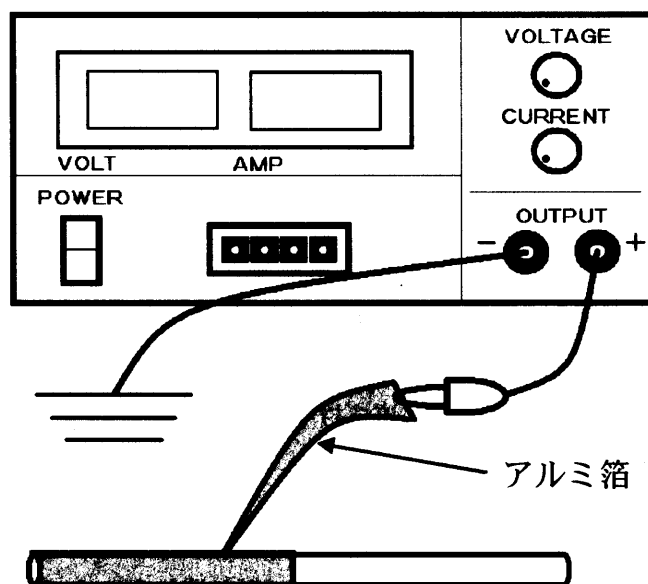


図6-6 直流電源にストローを接続する

【3】電気の中和現象（演示実験）

コルク・羊毛帽子・塩ビパイプを使った実験³⁾で、羊毛帽子で塩ビパイプをこすり、コルクに近づけるとコルクは静電気により反応するが、帽子をかぶせたまま近づけると帽子の電荷と塩ビパイプの電荷が打ち消し合うのでコルクは反応しない。このことから、羊毛の正電荷と塩ビパイプの負電荷が互いに打ち消しあったことがわかる。羊毛から塩ビパイプへと電子が移動した^{注)}ために正電荷と負電荷の電荷の量は同じになる。

注) 下線部について

正に帯電しやすいものから順に並べたものを帯電列という。帯電列は様々な物質を摩擦して、実験的に得られた関係図である。帯電列の中から2種のをこすり合わせて帯電させた場合、帯電列の前にあるものが正に、後ろにあるものが負に帯電する。電荷の動く方向は帯電列により説明される。

以下に帯電列の一例⁴⁾を示す。

シリコンゴム、窓用のガラス、岩塩、羊毛、絹、綿、ベークライト、エポキシ樹脂、硫黄、塩化ビニル

1) 実験道具

- ・コルク
- ・毛糸（羊毛100%、塩ビパイプに被せやすいように小さな帽子状に編んでおく）
- ・テグスなどの細くて軽い糸
- ・台

2) 実験方法

- ・塩ビパイプを羊毛帽子で摩擦し（図6-7）、帯電させコルクに近づける。
⇒塩ビパイプが帯電しているため、コルクの表面で静電誘導が起こる。これにより、塩ビパイプの動き（近づける、遠ざける、など）に合わせてコルクが反発する、引きつけられるという現象が起こる。
- ・塩ビパイプを羊毛帽子で摩擦し、帯電させ羊毛帽子を被せたまま近づける。
⇒塩ビパイプの負電荷と羊毛帽子の正電荷が打ち消し合いなので、コルクは動かない。
- ・上記の二通り近づけ方による、コルクの動きの違いを観察する。

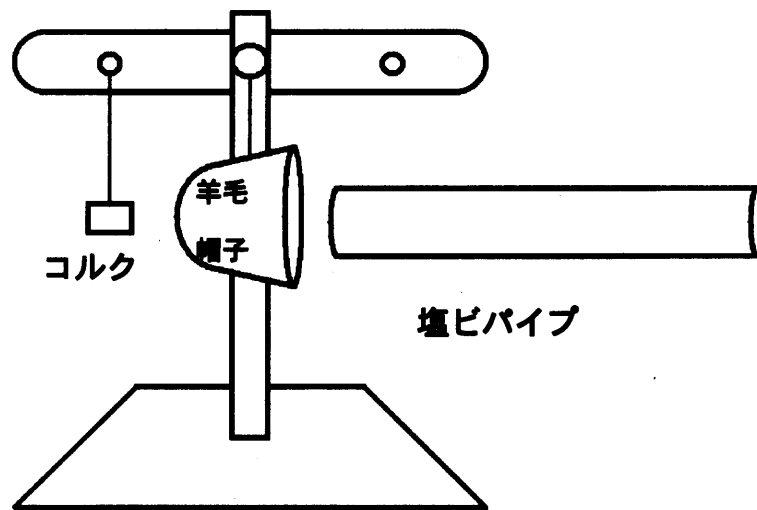


図6-7 電気の中和現象の実験器具

【4】アルミカップコンデンサーに静電気をためてネオン管を光らせる実験（生徒実験）

アルミカップコンデンサーを作製し、静電気をためてネオン管を光らせることで、静電気と動電気の正体は同じであるということを学習するための実験である。

1) 実験道具

- ・プラスチックコップ
- ・アルミ箔
- ・セロハンテープ
- ・ティッシュペーパー（ポケットティッシュ）
- ・塩ビパイプ
- ・ネオン管

2) 実験方法

- ・プラスチックコップ、アルミ箔、セロハンテープを用いてアルミカップコンデンサーを作る（図6-8）。
- ・塩ビパイプをティッシュペーパーでこすり、帯電させてアルミカップコンデンサーのベロに触れさせアルミカップコンデンサーに静電気を移す。
- ・静電気を移す作業を数回繰り返す。
- ・静電気をためたアルミカップコンデンサーにネオン管を近づけ光らせる。

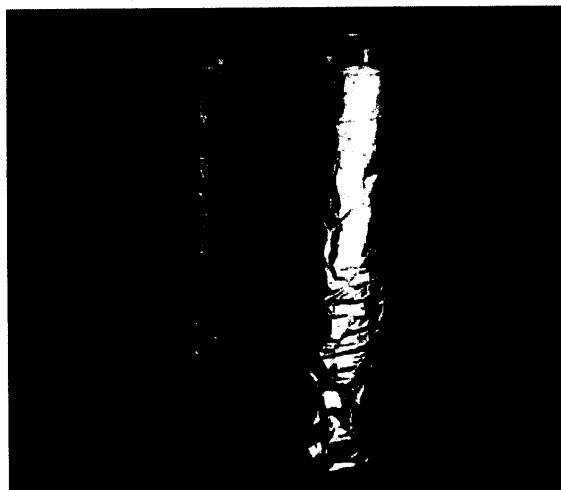


図6-8 アルミカップコンデンサー

これら4つの実験の関係について以下に述べる。

実験【1】は、生徒に静電気には2種類の電気（電荷）があることを気づかせると共に、生徒自身の手で摩擦している点が重要な要素となる。引き付け合いや反発をしていなかったものが、摩擦することによって引き付け合いや反発を起こす。このことから、摩擦をしたことによって、何らかの現象が起こった事は生徒にも容易に想像がつく。生徒自身に電荷について考えさせるきっかけとなるのである。そして、実験【2】は実験【1】で起こった現象を再確認すると共に、実験【1】をうまく行うことができなかった生徒にも引き付け合いや反発を見せ、フォローを行うことができる。また、シャボン玉を帯電させる方法として、静電気と直流電源の2種類で行うことで、静電気と動電気の正体が同じであることを確かめる実験【4】につなげやすい。実験【3】は、実験【2】の後に行う帯電の仕組みの説明、物質内部にはもともとプラスの電気とマイナスの電気が存在し、普段は両者のバランスがとれた状態だが、摩擦などにより電荷が移動することで、バランスが崩れ帯電する、という現象を実験的に証明するためのものである。片方からもう片方に電荷が移動したのであれば、両者合わせれば結局プラスの電気とマイナスの電気の量は同じであるので打ち消しあうことを生徒に実感させる。また、電荷の移動を実感させることで、実験【4】などにおいて、電子が移動することに結びつけることができる（電子は移動するものだという認識を持たせる）。実験【4】では、実験【2】の静電気と動電気の正体が同じだということを、静電気をためてネオン管を発光させることで確認する。

6-2 授業案・ワークシート・アンケートの内容

<授業実践内容>

以下に展開・配布したワークシートやアンケート⁵⁾の内容を示す。

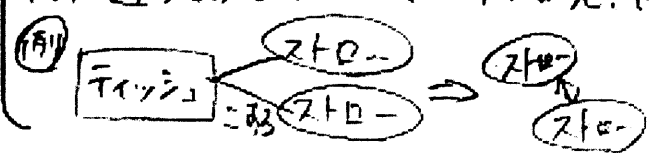
授業テーマ:電気の正体を探ってみよう

静電気-電荷のバランス・静電気から動電気へ-

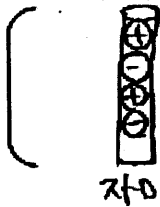
京中サイエンス

流れ (予定時間)	学習活動・授業の様子	準備物・教師の留意点など
導入 (10分)	授業開始時の様子 <アンケート> ○事前アンケートを記入する。 (後のアンケート<授業前>参考) <身近な静電気の現象について> ○セーターがパチパチ。 ○下敷きでこすると髪の毛が逆立つ。 ○ブラウン管のテレビの画面がパチパチ、髪の毛や埃がくっつく。 など、身近な静電気の現象についての紹介を	○自己紹介など。 ○準備物 *アンケート アンケートの記入方法を説明。教室内をまわりながら、書き方のわからない生徒には、再度説明を行う。 アンケートは記入後すぐに回収する。 ○身近な静電気の話をしなが、次に行う摩擦による静電気の発生の実験へとつなげる。下敷きの話はこすって静電気を発生させるので、次の実験につなげやすい。小学校のときに経験はない

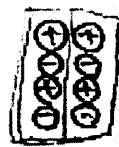
	聞き、今日の学習が静電気（電気）について ということを知る。	か、などの問いかけをしながら話をす る。
展開	<静電気の性質>	
展開Ⅰ (10分)	○実験1：こすって静電気を発生させよう。 (摩擦による静電気の発生：生徒実験) * 色々な材料で静電気を起こしてみよ う。(個人実験) ・ +と-がある。異種は引き合う。同 種は反発する。 配られたストロー・ナイロンテープ・ポケ ットティッシュ・ビニル袋以外にも身の回り の下敷き・髪の毛・セーター・カッターシャ ツ・消しゴムなどをこすり合わせて静電気を 発生させる。  摩擦の実験を行っている様子①  摩擦の実験を行っている様子② ⇒ ・ なかなかうまくいかない。 ・ おなじものを1つのものでこすると反発 する。	○準備物 * ワークシート (このときに配る) * ストロー、クリップ (1人2本) * 造り用ナイロンテープ (1人2本) * ポケットティッシュ (後の実験4で も使う。班で1袋) * ビニル袋 (1人2つ) ○静電気を起こした後の観察 (持ち方な どの注意事項) の仕方について説明する。 * ストローとクリップの使い方。 * その他のものの観察の仕方。 ○材料の使い方や静電気の発生のさせか たがわかっているか。静電気の反発・ 引きつけ合いが観察できているかを見 て、できていない生徒には支援するた めに、教室を巡視する。また、ワー クシートの記入の仕方にも留意する。 <摩擦による静電気の発生の位置づけ> 異種は引き合うということは本研究の モデル (数珠モデル、今回は触れない) の中でも用いている現象。このことを 確認するために行う。また、電荷には 2種類あるということも、モデルに置 いて重要な要素となる。

	・引き合うものと反発し合うものがある。 ・＋と－がある。 ・こすったものとかすられたものは引き合い同種のものは反発する。 などの意見があった。 <ワークシートの例> （何か違うものとおして、こすり合ったら、同じものは反発する。）  生徒○のワークシートより （何か違うものとおして、こすり合ったら、反発し合うものがある。プラスとマイナスの性質（電気）がストローの中にある。） 生徒Wのワークシートより	
展開Ⅱ (10分)	○生徒による話し合い（班）・発表。 ○なぜ静電気が起こるのかをグループで討論・発表 *発表は数班を代表で聞き、それと異なる意見がある場合のみその他の班も聞く。 ⇒生徒の発表  生徒が発表している様子	○準備物 *ワークシート ○現段階での静電気（正電荷と負電荷）に関する知識・理解を知るため。

*なぜ静電気が起こるのか考えよう。



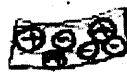
ストロー



マイナ



ストロー



ストロー

全部⊕と⊖の性質をもっているけど、こすることによって⊕がどちらかに集まって、⊖が反対側の性質をもつ。⊕と⊖は引き合うけど、⊕同士は引き合わない。

発表者のワークシート

<帯電現象> (説明)

展開Ⅲ
(10分)

○観察(演示実験)1:反発・引き付けあいを見てみよう。(帯電シャボン玉:演示)

⇒塩ビパイプ、直流電源を用いる。塩ビパイプでシャボン玉を負に帯電させ、塩ビパイプとの反発(手との引き付け)、直流電源を用いてシャボン玉を負に帯電させ、塩ビパイプとの引き付けを見る。

*静電気には2種類の電荷があることを知る。

⇒○手品みたいでびっくりした。

○シャボン玉も操ってしまう静電気はすごいと思った。

○どんなものにも電気があるんだと思った。

○不思議だった。感動した。

○シャボン玉がくっついていたのでおどろいた。

○シャボン玉にプラスかマイナス極が移動してビニル管と引き合った。

などの意見があった。

○帯電シャボン玉を用いて2種類の電荷があることを証明する。

○帯電シャボン玉

○準備物

*シャボン液

*アルミベロ付きストロー

*直流電源装置・導線

*塩ビパイプ

*羊毛

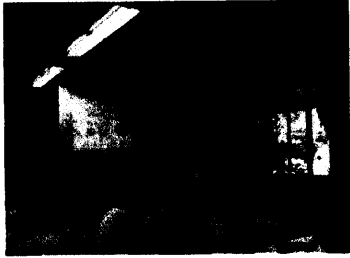
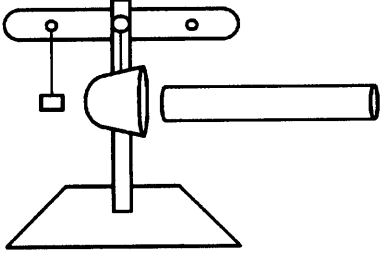
○静電気は天候・湿気の影響を受けやすい。このことから、当日実験が成功しないことも考えられるので、事前に帯電シャボン玉の実験を行っている様子を録画したDVDを用意しておく。

○当日、授業前に、天候等の影響がないか、実験可能か、予備実験を行う。

○シャボン玉は風の影響を受けやすいので、実験前に窓や扉などを閉める。

○シャボン玉を、静電気で負に、直流電源を用いて正に帯電させるので、同じアルミ箔をまいたストローを用いて行う場合は、電荷が残らないように注意する。

	<ワークシートの例> シャボン玉に正電流を流すことにより、正電荷を増やし、帯びた電荷は電気を帯びていたため、お互いに引きつけ合った。シャボン玉が空中に浮かんだ。 とても面白い!! 生徒Qのワークシートより	
展開Ⅳ (10分)	○どのようにして帯電するのか。静電気が起こるのか。 ⇒こすって静電気を作ることは発電と同じ。  説明を聞く様子①  説明を聞く様子②	○パワーポイント(脚注参照)で説明。 摩擦で静電気を発生させた実験や帯電シャボン玉から、電荷には2種類あるということを説明する。そして、マイナスの電気の粒(これが電子だということも伝える)が移動することによってバランスが崩れ、正と負に帯電することを、パワーポイントの図を元に説明する。 このときに、もし静電気発生実験の時にこすり合わせたものを触れさせることにより、静電気の現象が観察できないということが起こっていた場合、触れることにより、移動が起こり元に戻ってしまうのだということも説明。
	<中和現象>	

展開V (10分)	○観察(演示実験)2:打ち消しあい 中和現象を見ることにより電荷のバ ランスを意識する。  中和現象を観察する様子①  中和現象を観察する様子②	○コルク・羊毛帽子・塩ビパイプを使っ た実験。 *羊毛帽子で塩ビパイプをこすり、コ ルクに近づけるとコルクは静電気によ り反応するが、帽子をかぶせたまま 近づけると帽子の電荷と塩ビパイ プの電荷が打ち消し合うのでコルク は反応しない。 
	休憩	○実験2のセットを生徒の机に置く。
展開 展開VI (20分)	<静電気で作動させよう> ○実験2:アルミカップコンデンサーに 静電気をためてネオン管を光らせよ う。(生徒実験:班) *コンデンサーは(静)電気をためる電 池の役目。  作り方の説明を聞く様子	○プラスチック製のコップとアルミホイ ルを使ってコンデンサーを作る。 ○準備物 *コップ *アルミ箔 *セロハンテープ *ポケットティッシュ *塩ビパイプ *ネオン管 ○静電気をアルミカップコンデンサーに ためてネオン管を光らせることで 静電気=動電気 (動電気:日常生活の中で電化製



実験の様子①



実験の様子②



実験の様子③



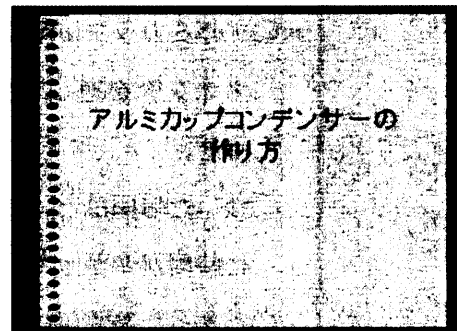
実験の様子④

品を動作させている電気)

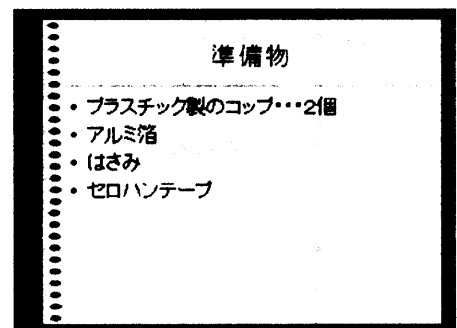
の概念を持たせる。

○生徒は“コンデンサー”という言葉を知らないので、電気をためる器具だということを説明する。

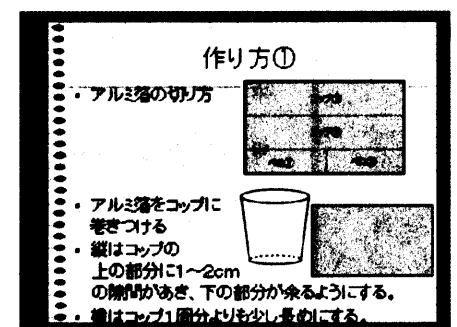
○アルミカップコンデンサーの作り方
(パワーポイント)



スライド①



スライド②



スライド③



実験の様子⑤

⇒○アルミカップに電気がたまって、それがネオン管を通して放電することがわかった。

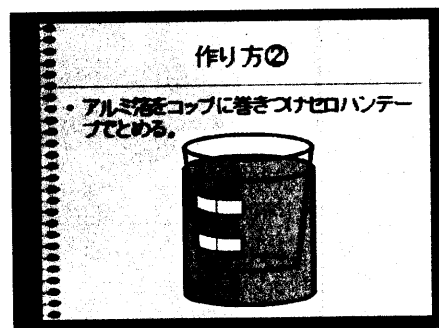
○ついた瞬間はとても感動した。つくまでに時間がかかった。

○たまった静電気によって一瞬光った。

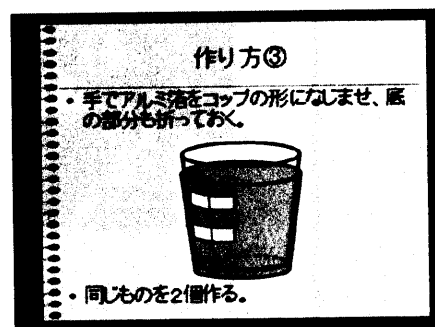
○電気をためると、ネオン管を近づけた時に赤く光った。

○なかなか光らなかった。

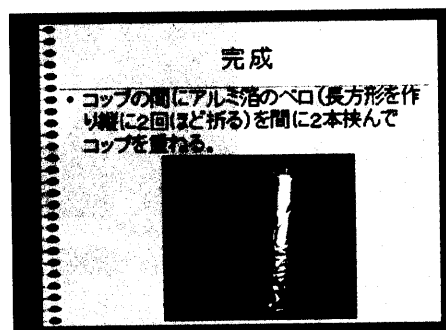
などの意見があった。



スライド④



スライド⑤



スライド⑥

(10分)

○生徒による討論・発表

* 今までの電流のイメージ

* 今日感じた電流のイメージ

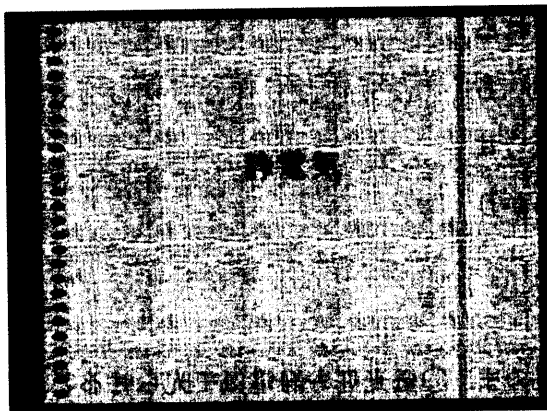
⇒○静電気も電気と一緒にのかなあと思った。静電気といえば、自然現象的なもので照明などの電気とは違うものというイメージがあるけれど結局は同じものなんだなあと思った。また、静電気はた

○授業を通して正電荷・負電荷に関する認識がどのように変化したか。

⇒アルミカップコンデンサーの実験で班によってかなりの時間差が生じたため、この部分に関してはワークシートかへの記入が主となった。

	めることができるというのがわかった。 ○身のまわりのもので電気をためられることに驚いた。僕らががんばっても、ちょっとしか光らないのに長時間光らせることができる電池のすごさがわかりました。 などの意見があった。	
(5分)	○アルミカップコンデンサーの実験のまとめ * 蛍光灯も静電気で光ることを知る。	○蛍光灯も静電気で光らせることができるというのは広く知られていることであるが、実際に実験を行うと光方が微かなためにわかりにくい。現象的にもネオン管を光らせることと重なる。しかし、蛍光灯は身近なものであり実感を持たせやすいので、ネオン管と同じように光らせることができることを伝える。
まとめ (5分)	○授業全体のまとめ * ワークシートに記入する。 ○授業後アンケートを記入する (後のアンケート＜授業後＞参考)	まとめ ・ 静電気の起こる仕組み ・ 物質中の電気のバランス ・ 静電気と動電気の電気の正体 ○準備物 * アンケート

(脚注) 静電気の仕組みの説明で用いたパワーポイント



スライド①

物質内部には
2種類の電気が存在

プラス マイナス
・ +の電気と-の電気
・ 昔は+と-が同じ量だけ存在している
 ので、バランスがとれて帯電していない。
⇒帯電とは・・・
 どちらかの電気の量が多くなると、物
 質は多くなった方の電氣的性質を持つよ
 うになる。

スライド②

どのようにして
帯電は起こるのか

・ 物質内部では通常、+と-のバランスが
 とれている。

スライド③

ところが・・・

・ 摩擦などによって-の電気を持つ小さな
 粒(電子)が移動する。
⇒移動の仕方は物質によって異なる。

スライド④

電気の正体を探ってみよう－ワークシート－

年 氏名

○実験１：こすって静電気を発生させよう。（個人実験）

<実験結果>

こすり合わせたものは何か？こすり合わせた結果、何と何が反発した（○）・引き付けあった（△）・何も起こらなかった（×）などを、それぞれ記号で書いてください。

表を全て記入しなくても構いません。自分が行ったものだけを記入してください。

例えば、ストロー２本とティッシュをこすり合わせてストロー同士、ストローとティッシュなどの組み合わせの結果を記入する場合は、表に記入してください。もしも、ティッシュでこすったストローとビニルひもでこすったストローなど、こすり合わせたものが違う実験をした場合は表の下にある文章の（ ）に記入してください。

何を 何で	()	()	()	()
ストロー	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が
ビニルひも	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が
ビニル袋	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が
ティッシュ	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が
そ の 他 ()	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が
そ の 他 ()	と が	と が	と が	と が
	と が	と が	と が	と が

- ・() でこすった () と () でこすった
() が ()
- ・() でこすった () と () でこすった
() が ()

・ () でこすった () と () でこすった
 () が ()

・ () でこすった () と () でこすった
 () が ()

*この結果言えることは何ですか？自由に書いてください。

$$\left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right]$$

*なぜ静電気が起こるのか考えよう。

$$\left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right]$$

○観察1：帯電シャボン玉を見て、気付いたこと・感じたことや感想を書いてください。

$$\left[\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right]$$

○観察2：中和現象（打ち消しあい）を見て、気付いたこと・感じたことや感想を書いて

$$\left[\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{array} \right]$$

ください。

○実験2：アルミカップコンデンサー（班実験）

***実験をして、気付いたこと・感じたことや感想を書いてください。**

$$[$$

○この授業全体の感想を書いてください。

—ワークステーション—
—ワークステーション—

○成金！：こすって貯蓄金を現金多せよう。（個人成金）

●●●●●

こすり合わせたものは何れがよりぬきやすか。何と知が変化した (○)・引き付けあった (△)・何れもこうなかつた (×) など。それぞれ図形で書いてください。

※現金で買入しなくてもいいません。貴方が行ったものだけを組入してください。

例へば、ストローと本とティッシュをこすり合わせてストロー同士、ストローとティッシュなどの
間やむすの隙間は入るものはない、裏に記入してください。もしも、ティッシュでこすったストロ
ーとビニールでこすったストローなど、こすり合わせたいものが違う種類をした場合は表の下にある
文庫の() に記入してください。

部名	(ア) アーチェ	(イ) イロハニホト	(ウ) ウツク	(エ) エンジン	(オ) オート
ストロー	X	X	X	X	X
ピストン	X	X	X	X	X
ピストン	X	X	X	X	X
タイシン	X	X	X	X	X
その他	X	X	X	X	X
その他	X	X	X	X	X

●この結果重なることは何ですか？自由を書いてください。

वि. वि. वि. वि. वि.

この場合せしめと、つりあはれた。そのは
ひ。つ。

●なぜ映画電氣が怒りものか考えよう。



ਅੰਤਰ

[illegible]

五、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五、十六、十七、十八、十九、二十、二十一、二十二、二十三、二十四、二十五、二十六、二十七、二十八、二十九、三十、三十一、三十二、三十三、三十四、三十五、三十六、三十七、三十八、三十九、四十、四十一、四十二、四十三、四十四、四十五、四十六、四十七、四十八、四十九、五十、五十一、五十二、五十三、五十四、五十五、五十六、五十七、五十八、五十九、六十、六十一、六十二、六十三、六十四、六十五、六十六、六十七、六十八、六十九、七十、七十一、七十二、七十三、七十四、七十五、七十六、七十七、七十八、七十九、八十、八十一、八十二、八十三、八十四、八十五、八十六、八十七、八十八、八十九、九十、九十一、九十二、九十三、九十四、九十五、九十六、九十七、九十八、九十九、一百。

1941-42
1942-43
1943-44

10-11-12

[illegible]

（四）“王”字（王）

॥ श्रीगणेशाय नमः ॥

中野照象（打も押しあい）を見て、知れたこと・感じたことや感想を書いてください。

○ 435

(8) 1970-1971

[illegible]

お問い合わせ：アムニカサブコンパニィー（東京本社）

を表現として、気付いたこと・感じたことや感想を書いてください。



121 卷一

この調査全体の結果を書いてください。

卷之六

1-3418

電気の正体を探ってみよう

○実験1：こすって静電気を発生させよう。【個人実験】

＜実験方法＞

配布されたストロー・ビニルテープ・ビニル袋・ティッシュペーパーをこすり合わせて、静電気を発生させてください。それ以外に身の回りにあるものを使っても構いません。

＜実験結果の書き方＞

こすり合わせたものは何か？こすり合わせた結果、何と何が反発した（○）・引き付けあった（△）・何も起こらなかった（×）などを、それぞれ記号で書いてください。

表を全て記入しなくても構いません。自分が行ったものだけを記入してください。

例えば、ストロー2本とティッシュをこすり合わせてストロー同士、ストローとティッシュなどの組み合わせの結果を記入する場合は、表に記入してください。もしも、ティッシュでこすったストローとビニルひもでこすったストローなど、こすり合わせたものが違う実験をした場合は表の下にある文章の（ ）に記入してください。

○観察1：帯電シャボン玉【演示実験】－静電気の起こる仕組みについて知ろう－

- * 電気を帯びたシャボン玉がどんな動きをするかよく観察しよう。
- * 静電気を発生させたときのことを思い出してみよう。
- * なぜ？どのように？静電気は起こるのだろう。
- * 物質中の電気のバランスについて知ろう。
- * 電気のバランスが崩れると・・・

○観察2：中和現象（打ち消しあい）【演示実験】－物質中の電気について知ろう－

- * 物質中の電気のバランスについて確かめよう。

○実験2：アルミカップコンデンサー【班実験】

＜実験方法＞

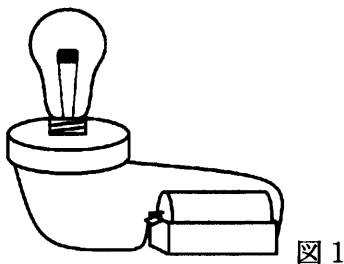
1. アルミカップコンデンサーを作る（パワーポイントの説明を参考）。
 2. 塩ビパイプをティッシュでこすり静電気を発生させる。
 3. 静電気を発生させた塩ビパイプをアルミカップコンデンサーのベロに触れさせ、電気をアルミカップコンデンサーにうつす。
 4. 2・3の操作を繰り返しアルミカップコンデンサーに電気をためる。
- ネオン管をベロに触れさせてみる。

アンケート

[2年生 3年生] 氏名

<授業前>

これまでに学校（小学校・中学校）で電気回路について学習してきたと思います。学校で学習した内容や自分自身の考えや経験をもとに答えてください。



上の図のような電池と電球が導線でつながった電気回路があります。

この電気回路（図 1）について次の質問に答えてください。

1. なぜ、電球は光るのかということについて、できるだけ多くのことを説明してください。このとき電池と電球の両方の働きについて考えながら答えてください。
2. この回路を電球が光っている状態で放置すると、いつか電球は消えてしまいます。このことを、一般に電池が切れるといいます。このような現象が起こるのはなぜだと思いますか？
3. “電流”という言葉を知ると、どのような状態を思い浮かべますか？
a. 液体 b. 気体 c. 粒子 d. 固体 e. その他（ ）
4. a) 図 1 の回路において導線の長さを 100 倍にすると電球の明るさはどうなると思いますか。
a. 同じ b. 明るくなる c. 暗くなる又はつかない。
b) a) の状態から、導線の長さは変えずに電球の位置だけを電池の近くに移動させると電球の明るさはどうなると思いますか。
a. 同じ b. 明るくなる c. 暗くなる d. つかない
5. 静電気と電流（電化製品を動かしているものや、乾電池などの電源によって発生するものと考えてください。）の正体は【 同じ ・ 異なる 】

アンケート

[2年生 3年生] 氏名

<授業後>

この授業を受けて、考え方が変わったことや気付いたことを元に次の質問に教えてください。

1. 電気の正体について、授業前に考えていたもの、現在考えているもの両方を比べて理解が進んだかどうかを記入してください。

良くわかった わかった 普通 あまりわからなかった わからなかった

2. 静電気と動電気（日常生活で、電化製品を動かしているもの）の正体は同じマイナスの電気の粒（電子）です。この授業を受けて感じたことに○をつけてください。

良くわかった わかった 普通 あまりわからなかった わからなかった

3. 電気のバランスについて、授業を受けて感じたことに○をつけてください。

良くわかった わかった 普通 あまりわからなかった わからなかった

4. 電流が流れる仕組みについて、授業を受けて感じたことに○をつけてください。

良くわかった わかった 普通 あまりわからなかった わからなかった

5. この授業で学んだこと・分かったこと・気付いたこと・理解したことについて自由に記入してください。

ご協力ありがとうございました。

（このアンケート結果は、京都教育大学大学院理科教育専修の研究のために用います。他の目的で使用することはありません。）

6-3 アンケート結果

<アンケート結果>

1) 授業前アンケート

アンケートの1に関しては自由記述で、回路についての理解やとらえ方、現段階での知識を知るために行った。2に関しても自由記述で、電源部分（主に電池）に関する理解に関するものである。3、4 a)、4 b)、5は選択式で、それぞれ、電流の概念、抵抗の概念に関する理解、回路内における電子（電流）の動きと抵抗の概念の関係についての理解、静電気と動電気（アンケートでは“電流（日常生活で電化製品を動かしているものや、乾電池などの電源によって発生するものと考えてください。）”と記述）に関して現段階でどのような概念をもっているかを調べるための問いである。また、授業後アンケートと比較することで、授業前後で概念がどのように変化したのかということを知ることができる。

以下に選択形式で行った授業前アンケートの3、4 a)、4 b)、5の結果を示す。

授業前アンケート3

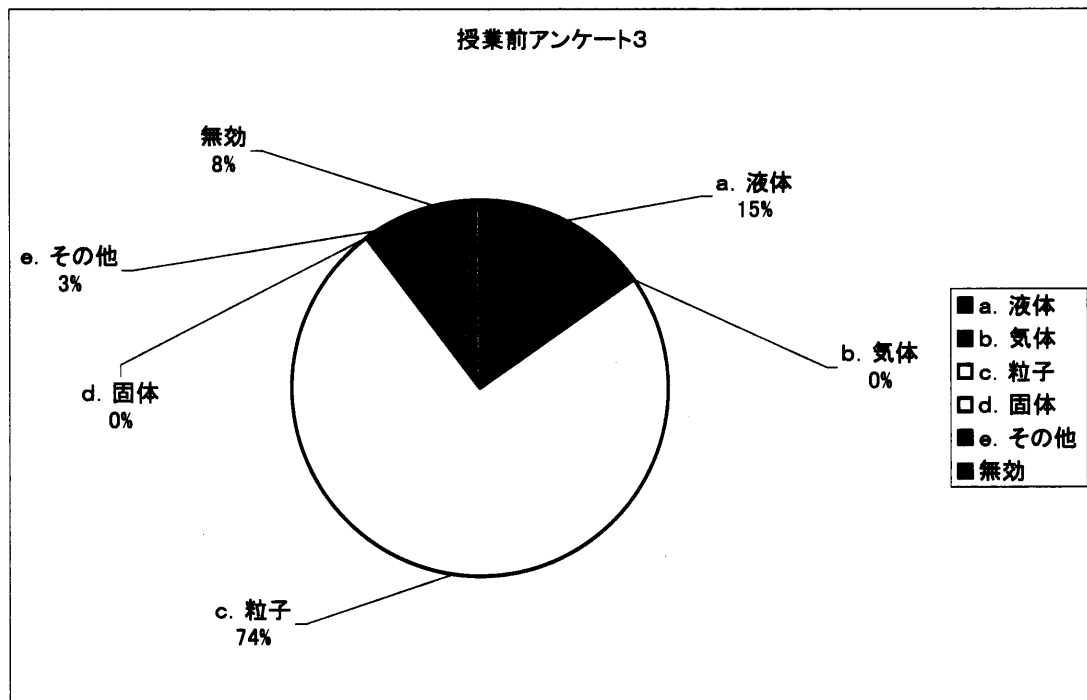


図6Ⅲ-1 授業前アンケート問3の結果

＜アンケート内容＞

“電流”という言葉を知ると、どのような状態を思い浮かべますか？

- a. 液体 b. 気体 c. 粒子 d. 固体 e. その他()

気体・固体と答えた生徒は一人もいなかった。また、無効となった生徒に関しては、複
数（2種類）の答えを記入（液体・粒子と答えた生徒が1名、粒子・その他（ビリビリ）
と答えた生徒が2名）しており、正確な概念が読みとれない。粒子とその他（ビリビリ）
と回答した生徒2名は粒子概念をもっているとも考えられるが、今回、複数回答はすべて
無効とした。複数回答をしている生徒がいることに関しては、アンケート実施の際に記入
上の注意を行う必要があったといえる。しかし、無効となった生徒に共通して言えること
は、粒子とそれ以外の何かと答えていたことである。その他と答えた生徒1名はエネルギ
ーと記入していた。

液体と答えた生徒が15%、粒子と答えた生徒が74%である。

液体と答えた生徒は全員、授業前アンケートの

1. なぜ、電球は光るのかということについて、できるだけ多くのことを説明してく

ださい。このとき電池と電球の両方の働きについて考えながら答えてください。

に対して、“電流が流れる”という言葉を用いて記入している。電流は“流れる”ものであるという概念が、液体であるというとらえ方につながったといえる。

しかし、粒子と答えた生徒の多くも“電流が流れる”という言葉を用いて記入している生徒が多く、粒子という言葉を用いて説明している生徒は2名のみであった。また、アンケートの問2（この回路を電球が光っている状態で放置すると、いつか電球は消えてしまいます。このことを、一般に電池が切れるといいます。このような現象が起こるのはなぜだと思いますか？）で、電池内部には気体が存在していると記述しているにもかかわらず、問3では同じ生徒が粒子と回答するということが起こっており、概念に関してあやふやな理解をしていると考えられる。また、問1の回答として、無記入や分からないという答えも多く見られた。このことから、理解した上で粒子と答えている生徒は少ないと考えられる。

授業前アンケート 4 a)

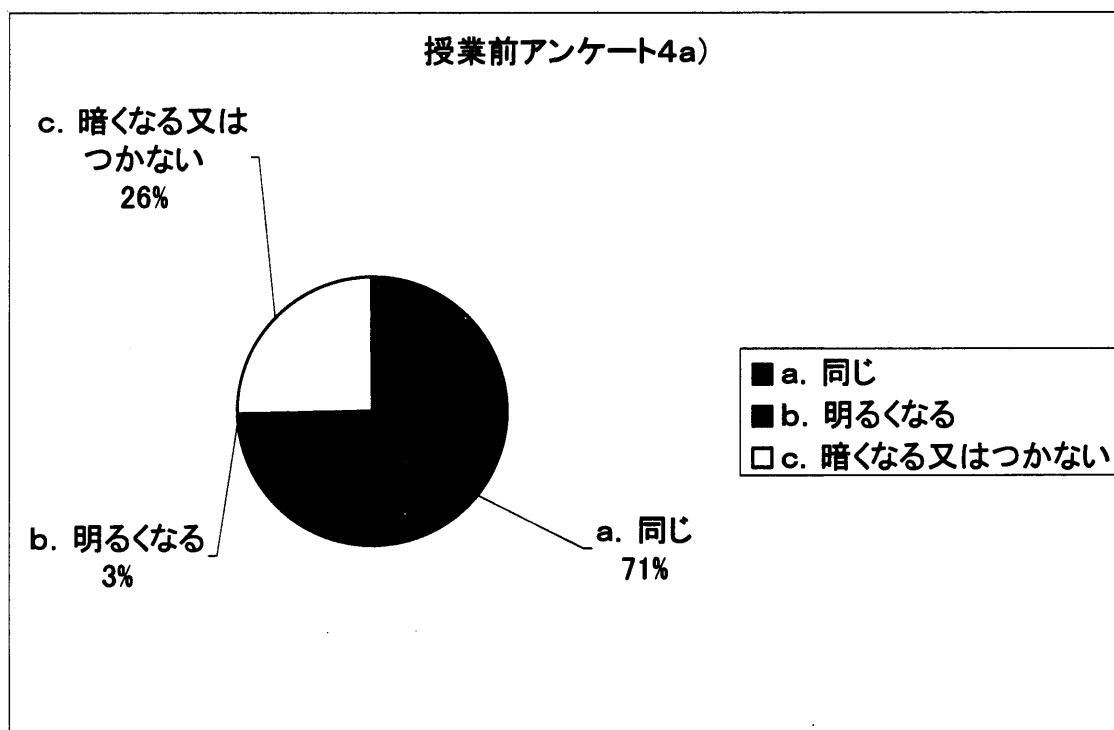


図6Ⅲ-2 授業前アンケート問4 a) の結果

<アンケート内容>

図1の回路において導線の長さを100倍にすると電球の明るさはどうなると思いますか。

- a. 同じ b. 明るくなる c. 暗くなる又はつかない

これは、導線の持つ抵抗についてのアンケートである。71%が同じ、3%の生徒が明るくなると答えている。実際は導線には抵抗があるので、c. 暗くなる又はつかないが正解である。しかし多くの生徒が、導線には抵抗がないという間違った概念を持っていることになる。cと回答した生徒は26%と、わずか4分の1程度である。このことから、5章－電子の動きを表すモデルで示した数珠モデルの抵抗モデルの必要性が挙げられるのではないだろうか。

授業前アンケート 4 b)

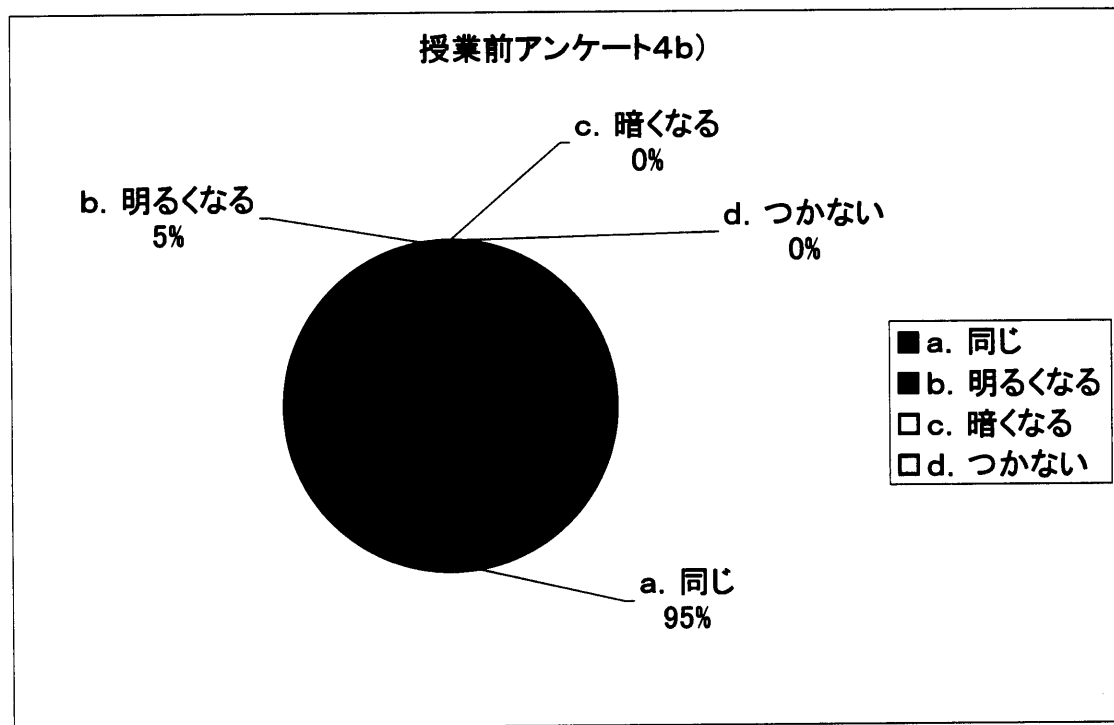


図6Ⅲ-3 授業前アンケート問4 b) の結果

<アンケート内容>

a) の状態から、導線の長さは変えずに電球の位置だけを電池の近くに移動させると電球の明るさはどうなると思いますか。

a. 同じ b. 明るくなる c. 暗くなる d. つかない

大多数である95%が同じであると答えたが、5%の生徒が明るくなると答えた。数珠の样につながった状態で、電子が一斉に動くという数珠モデルであれば明るくなるという誤概念は払拭できるのではないだろうか。

授業前アンケート5

<アンケート内容>

静電気と電流（電化製品を動かしているものや、乾電池などの電源によって発生するものと考えてください。）の正体は【 同じ ・ 異なる 】

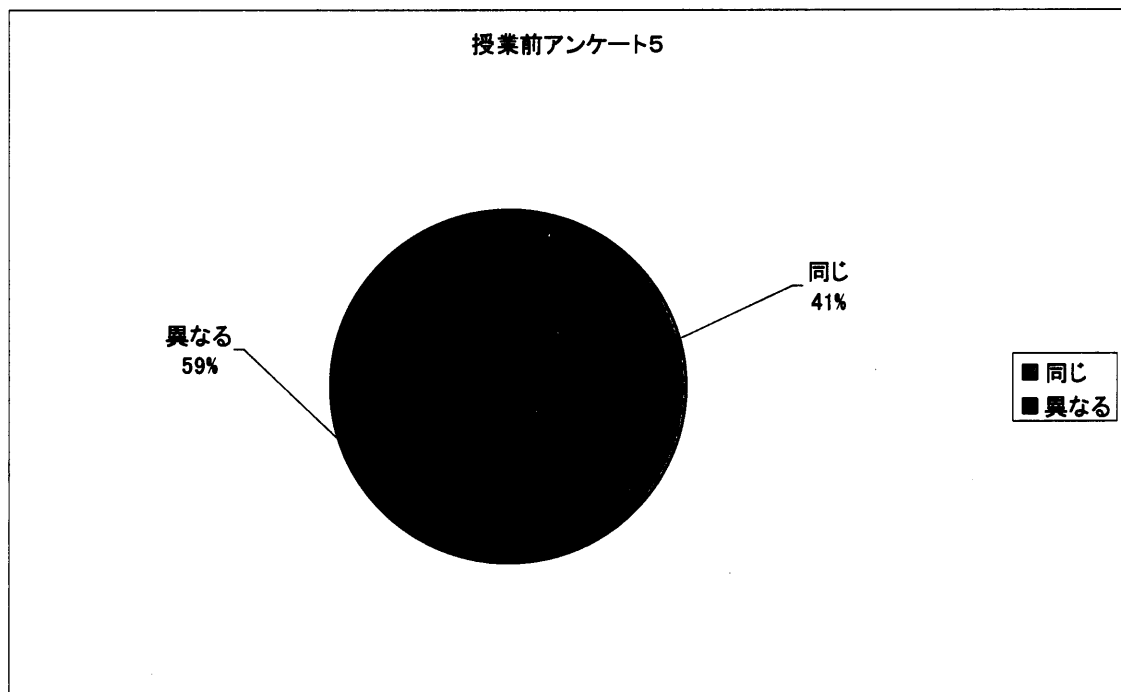


図6Ⅲ-4 授業前アンケート問5の結果

異なると答えた生徒が59%、全体の約6割を占めており、静電気と動電気（電流）の正体は同じであることを理解していない生徒が多い。現行の中学校の理科の教科書では、電気分野の章の始めに、静電気に関しての記述がなされている。にもかかわらず、静電気と動電気（電流）が同じものが原因で引き起こされる現象だということを理解していない。これは、中学校理科では電気回路の導入の部分で静電気の学習を行い、その後回路（電流）の学習へと展開していく流れになっており、静電気の説明の部分では、各教科書会社、－（マイナス）の電気の粒が移動するために静電気は起こると説明されている。しかし、回路（電流）の学習になった途端に、この－の電気の存在は記されなくなることと関係していると考えられる。

2) 授業後アンケート

授業を受けて、考え方が変わったことや気付いたことを基に、質問に、良くわかった・わかった・普通・あまりわからなかった・わからなかったという5つから選択肢から選んで答えてもらった。

授業後アンケートの内容は以下の通りである。

1. 電気の正体について、授業前に考えていたもの、現在考えているもの両方を比べ

て理解が進んだかどうかを記入してください。

2. 静電気と動電気（日常生活で、電化製品を動かしているもの）の正体は同じマイナスの電気の粒（電子）です。この授業を受けて感じたことに○をつけてください。
3. 電気のバランスについて、授業を受けて感じたことに○をつけてください。
4. 電流が流れる仕組みについて、授業を受けて感じたことに○をつけてください。
5. この授業で学んだこと・分かったこと・気付いたこと・理解したことについて自由に記入してください。

問1は授業前アンケートの問3と、問2は授業前アンケートの問5と比較するための問いである。それぞれの問いは、「数珠モデル」を理解する上で必要な概念（電気の正体、電荷のバランスなど）を得られたか、授業前後で理解が進んだかを知るための内容である。また、その他の問いに関しても授業前アンケートとの比較を行った。

以下に、授業後アンケートの問1～5の結果を示す。

授業後アンケート1

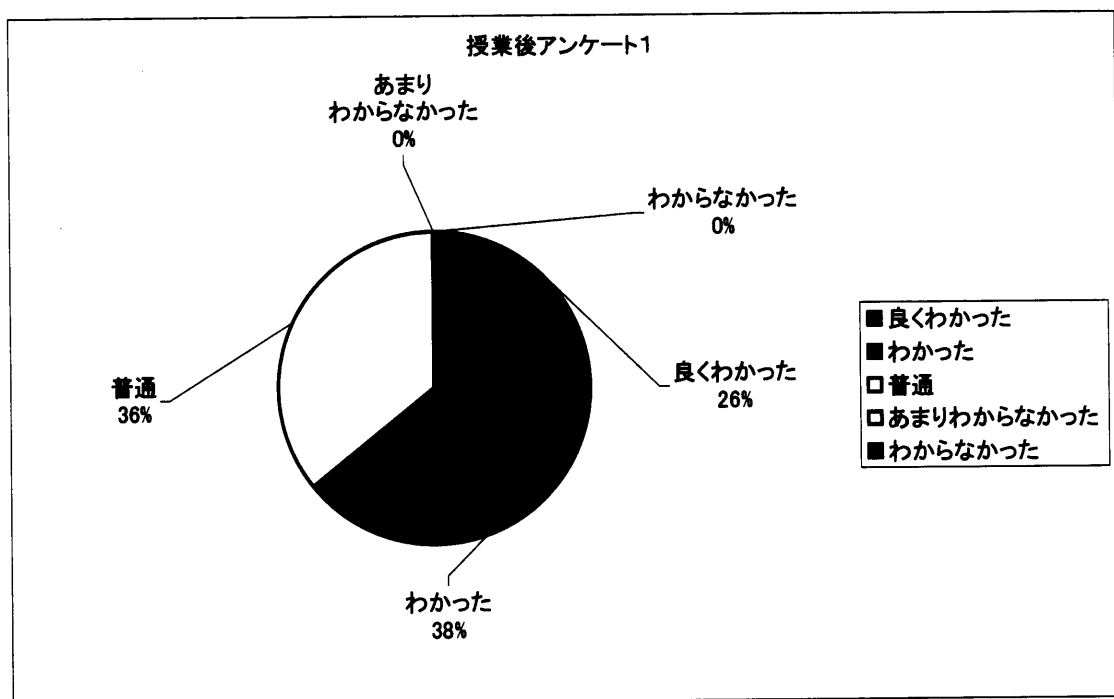


図6Ⅲ-5 授業後アンケート問1の結果

授業後アンケート 2

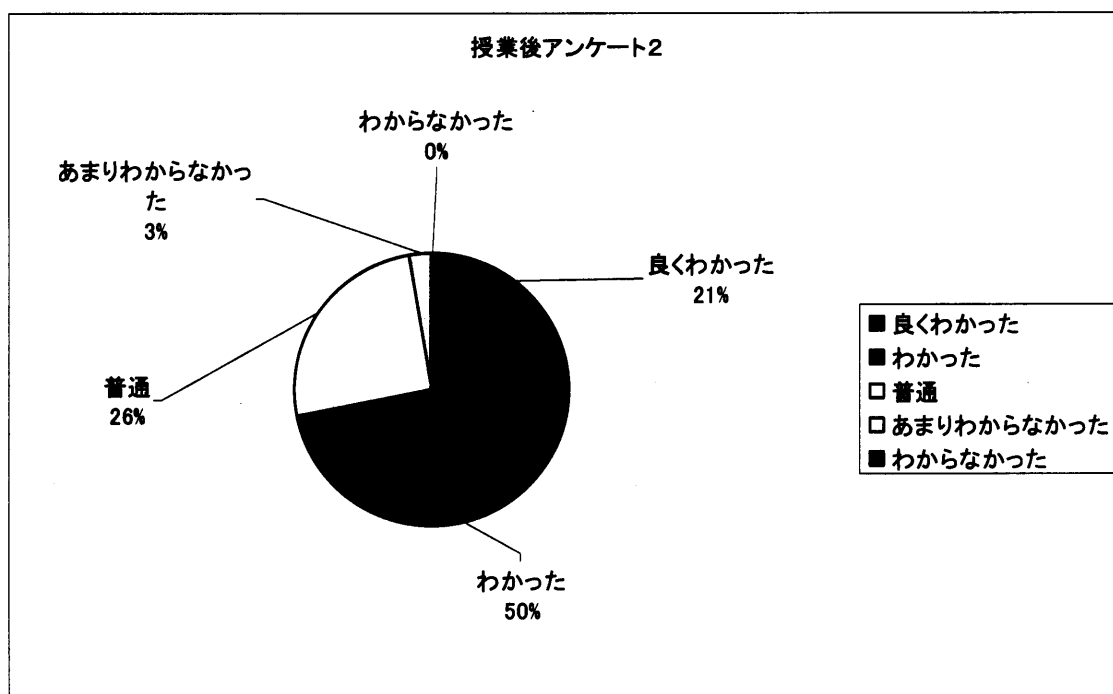


図 6 Ⅲ－6 授業後アンケート問 2 の結果

授業後アンケート 3

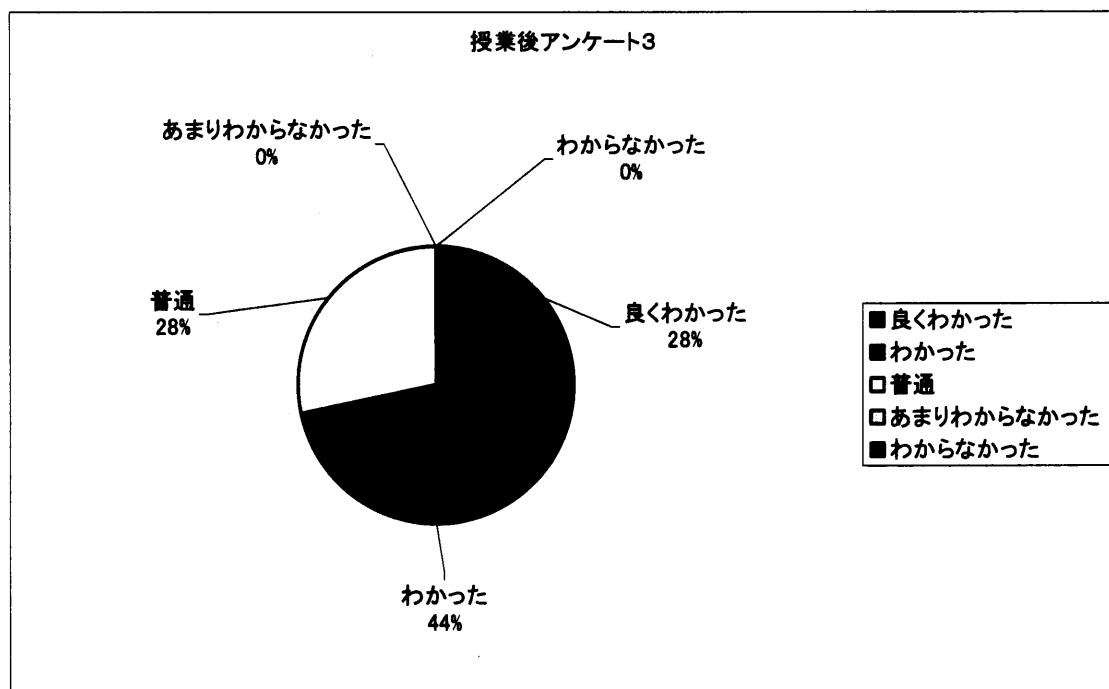


図 6 Ⅲ－7 授業後アンケート問 3 の結果

授業後アンケート4

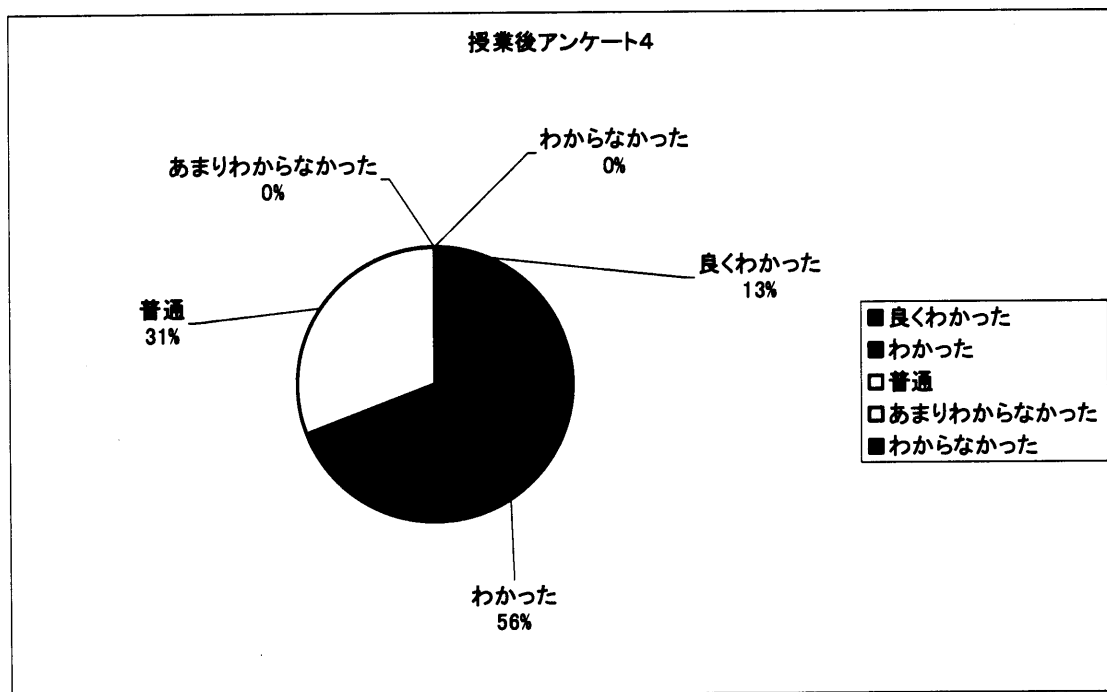


図6Ⅲ-8 授業後アンケート問4の結果

<アンケート結果より>

授業後アンケートの問1では、あまりわからなかった・わからなかったという答えは0%で、よくわかった・わかったという答えは全体の64%を占めている。

この授業の大きな目的で特に重要な部分は電気の正体が電子であるということ、静電気と動電気の正体は同じであるという点であると先に述べた。そこで、授業前アンケートの問3と比較（図6Ⅲ-9）して、生徒の概念の移り変わりについて検討する（解析手法については、文献6）参照）。

授業前アンケートの問3で、気体・固体と答えた生徒は一人もいなかった。また、無効となった生徒（複数回答しているため、正確な概念が読みとれない）は8%で、共通して言えることは、粒子とそれ以外の何かと答えていたことであった（先述したが、液体・粒子と答えた生徒が1名、粒子・その他（ビリビリ）と答えた生徒が2名）。その他3%はエネルギーと記入。液体と答えた生徒が15%、粒子と答えた生徒が74%であった。

そこで、特に授業前アンケートの問3で、液体と答えた生徒15%に注目しながら考察を行った。これは、他の生徒に関しては少なくとも粒子的な概念やエネルギーに関する概

念を持っているからである。

授業前アンケートで電流の状態は液体だと答えた生徒は授業後アンケートでは、良くわかったと答えた生徒が半数、残りの半分は普通と答えていた。よくわかったと答えた生徒に関しては、授業後アンケートの他の問いに関する答えも良くわかった・わかったと答えている。一方普通と答えた生徒に関しては全員が（あまりわからなかった・わからなかったという答えはなかったが）、授業後アンケートの他の問いでも少なくとも一つ以上普通と答えている（表6-1、6-2）。

授業前アンケート 問い3

授業後アンケート 問い1

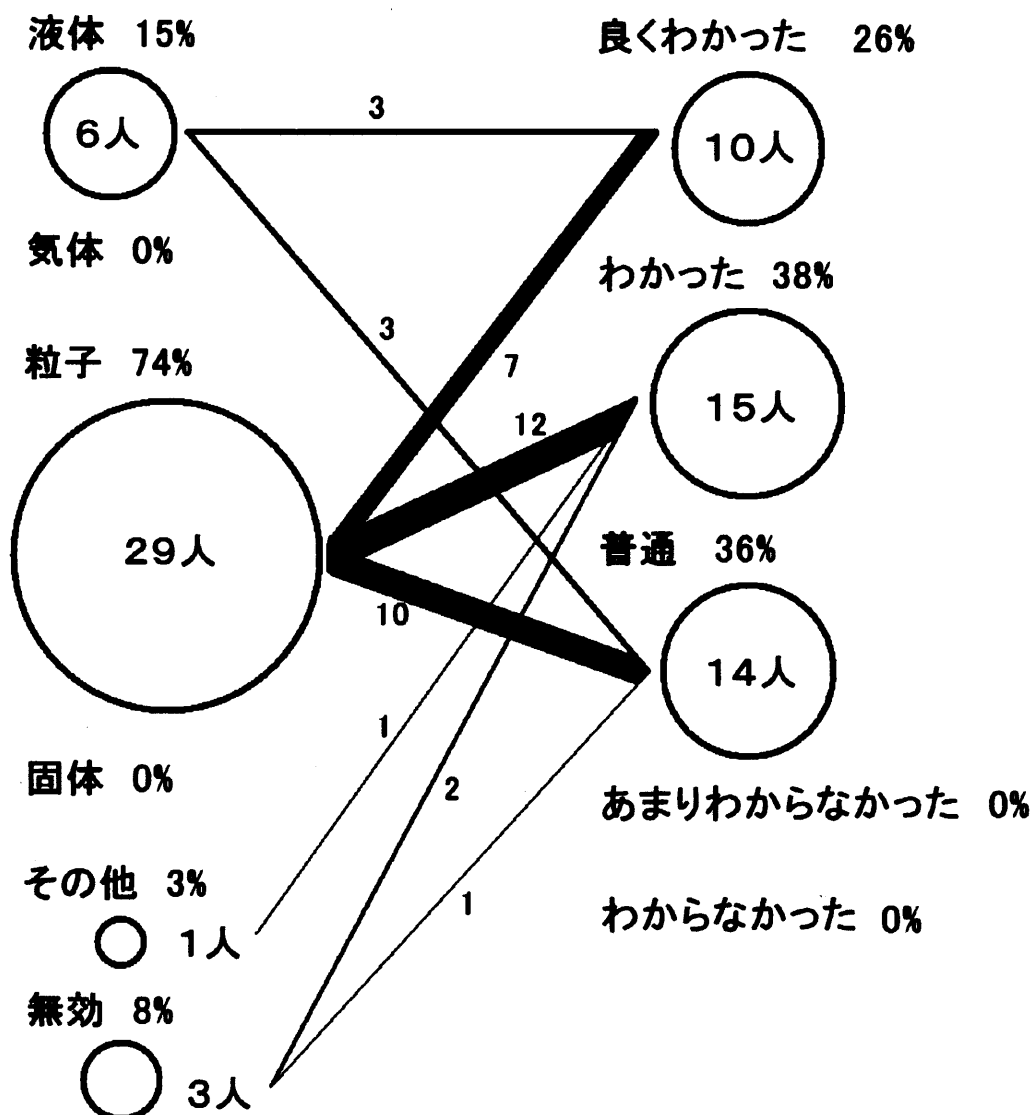


図6Ⅲ-9 授業前アンケート問3と授業後アンケート問1の比較

表6-1 授業前アンケートの問い3で液体と答えて

授業後アンケートの問い1で良くわかったと答えた生徒のアンケート結果

授業後アンケートの問い 良くわかった と答えた生徒	問い1	問い2	問い3	問い4
生徒A	良く わかった	良く わかった	良く わかった	良く わかった
生徒B	良く わかった	良く わかった	わかった	良く わかった
生徒C	良く わかった	わかった	わかった	わかった

表6-2 授業前アンケートの問い3で液体と答えて

授業後アンケートの問い1で普通と答えた生徒のアンケート結果

授業後アンケートの問い 普通 と答えた生徒	問い1	問い2	問い3	問い4
生徒D	普通	良く わかった	普通	わかった
生徒E	普通	わかった	良く わかった	普通
生徒F	普通	普通	普通	普通

このことから、授業後アンケートの問い1で良くわかったと答えた生徒は授業の内容を理解し、電子に対する概念が深まったといえる。授業後アンケートの問い5 “この授業で学んだこと・分かったこと・気付いたこと・理解したことについて自由に記入してください。” に関しても、

(生徒A)

電子についての理解がすすんだ。静電気ってすごい！！

(生徒C) 静電気について理解できた。

と記入されている。ワークシートの授業全体の感想に関しても、

(生徒A)

おもしろかったです。

(生徒B)

わかりやすく説明してもらえたので電気について理解できた。

と記入し、理解できたことや授業に関する興味が書かれている。

そして、授業後アンケートの問い1で普通と答えた生徒は、他の問いに関する答えからも良くわかったと答えた生徒よりも授業の理解が低かったといえる。また授業後アンケートの問い5 “この授業で学んだこと・分かったこと・気付いたこと・理解したことについて自由に記入してください。” に関して、

(生徒D)

静電気や動電気についてよく分かった。

(生徒E)

電気がつくのは静電気が関係していることがわかりました。

と理解が深まったという内容を記入しているが、ワークシートの授業全体の感想に関しては、

(生徒D)

電気や電力についてたくさんわかった。

(生徒E)

今日は初めて知ることが多く、すごくためになりました。

これから、光を見る目が変わりそうな気がしました。

(生徒F)

静電気について、少しよく分かりました。

と、“少し分かった” という表現や“光を見る目” という記述からも、授業後アンケートの問い5で書かれていた、“わかった” という表現は多少理解の低いものではないかと考えられる。

その他の、授業前アンケートで粒子的な概念やエネルギー的な概念を持っていた生徒については、授業前アンケートの問い3でその他・エネルギーと答えた生徒は、負電荷と正電荷のエネルギーの偏りを理解するのに有効な概念を持っていると言えるだろう。実際に

授業後のアンケートの結果では、問い3の“電気のバランスについて、授業を受けて感じたことに○をつけてください。”という問いに対して、良くわかったと回答している。

授業前アンケートの問い3で粒子と答えた、電流に対して何らかの粒子概念を持っている生徒に関してだが、前にも述べたが授業前アンケートの問い1“なぜ、電球は光るのかということについて、できるだけ多くのことを説明してください。このとき電池と電球の両方の働きについて考えながら答えてください。”に対して、粒子と答えた生徒の多くも“電流（電気）が流れる”という言葉を用いて記入している生徒がいたという結果になっている。以下にその例を示す。

（生徒L）

電球に電気が流れて光る。電池は電気を流す働きをする、電球は光る働きをする。

（生徒N）

電池から電流が流れて、タングステンは抵抗が大きいので熱せられて光を発する。

（生徒T）

電気が流れたから。

（生徒V）

電池は+極から一極に電流が流れる。なので回路を一方向に流れる。

電球の中のフィラメントは抵抗が大きいので熱が生じる。

（生徒P）

電池の一極からどうせんに電流が流れて、豆電球が光る。

生徒Pのみ、一極からという表現を用いていた。この生徒は、電子がマイナスであり、電子が電流に関係しているという知識を持っていたと考えられる。

“できるだけ多くのこと、電池と電球の両方の動きについて”という問いかけの仕方をしているため、豆電球のフィラメントについてのみ記述している生徒2名に関しては、この記述から、電流の概念については読みとれなかった。アンケートの問いかけ方法を検討する必要があるかもしれない。

粒子・粒という言葉を用いて説明している生徒は2名のみであった。以下にその記述内容を示す。

（生徒H）

電池の中にある小さな粒が導線をつたって電球にいき、フィラメントのところで抵抗して光る。

(生徒Ⅰ)

導線の中を粒子が走っている。

この、粒子・粒という表現を用いて説明している生徒の記述（上記参照）を見ると、粒子が走るという表現がなされている。今回中学校で授業実践を行ったため、高校で学習する概念を必要とする“数珠モデル”は取り扱わなかったが、“数珠モデル”を用いると“導線の中を粒子が走る”という誤概念は払拭されるのではないだろうか。

授業前アンケートの問3で液体・その他（エネルギー）以外と答えた、何らかの粒子概念をもっていると考えられる生徒32名の授業前アンケートの問い1の内容を表現別に分類し、まとめると表6-3のようになった。（ ）に示す人数は授業前アンケートの問3で粒子と答えた生徒29名の内訳である。

表6-3 粒子概念をもっていると考えられる生徒32名の
授業前アンケート問い1の表現別分類

() に示す人数は授業前アンケートの問3で粒子と答えた生徒

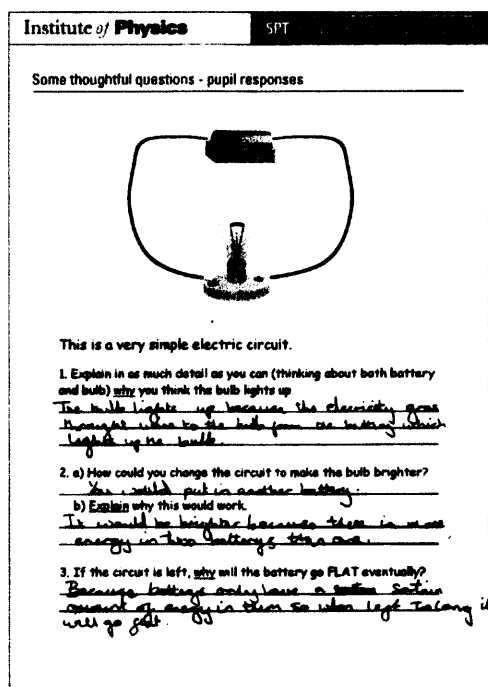
電気・電流が“流れる”	11人 (10人)
電気・電流が“通る”	7人 (7人)
電気・電池があるから、電池の力	4人 (2人)
フィラメントについてのみ記入、電流については触れず	2人 (2人)
粒子・粒という言葉を用いている	2人 (2人)
導線を電気が“伝う”	1人 (1人)
化学エネルギーが光エネルギーに変化	1人 (1人)
わからない・無回答	4人 (4人)

これらのことから、理解した上で授業前アンケートで粒子と答えている生徒は少ないと考えられる。しかし、授業後のアンケートでは、どれも“良くわかった”“わかった”などが過半数（6割以上）をしめており、この授業実践により、生徒の理解が深まったと考えられる。

授業後アンケートの問い2に関しては、授業前アンケートの問い5で静電気と動電気（電

習をしているが、high school では電気について学習する前の12歳の生徒である⁵⁾。これは、日本の中学生レベルと同等と考えられるためアンケートを参考にした。

シンポジウムで紹介されたアンケートの記入例は3例のみ(図6Ⅲ-2)であること、問の文面が異なることから比較は難しいが、授業前アンケートの問1、2と BRITISH COUNCIL のアンケートの回答を比較した。図6Ⅲ-12に BRITISH COUNCIL のアンケートの回答、3例を示す。図6Ⅲ-12の Student response 1では問1に対して、電球が光るのは電気が電池から導線を通して電球に送られるからだと回答している。Student response 3では、電池が電気を持っていて導線が電気を渡すと電球は光ると回答している。これらは表6-3(粒子概念をもっていると考えられる生徒32名の授業前アンケート問1の表現別分類)で分類した電気・電流が流れるまたは通ると回答した生徒と同じ概念であると考えられる。しかし、Student response 2に関しては、“電気は電池の両端から導線を通して電球までやってくるので、電球は光ることが出来る”と答えている。これは、電気にはプラスとマイナスが存在するという概念を持っているといえる。授業実践で実施したアンケートの回答には、このような例はなかった。この件に関しては、日本とイギリスのカリキュラムの違いによるものなのか、もっと他の部分に原因があるのか検討しなければならない。今後の課題と言えるだろう。



—アンケートの原文⁵⁾—

Some thoughtful questions-pupil rezones

This is a very simple electric circuit.

1. Explain in as much detail as you can (thinking about both battery and bulb) why you think bulb lights up.

2.a) How could you change the circuit to make the bulb brighter?

2.b) Explain why this would work.

3. If the circuit is left, why will the battery go FLAT eventually?

図6Ⅲ-11 参考にした BRITISH COUNCIL のアンケート⁵⁾

Student response 1

1. The bulb lights up because the electricity goes through wire to the bulb from the battery which lights up the bulb.
2. You would put in another battery
It would be brighter because there is more energy in two batteries than one
3. Because batteries only have a certain amount of energy in them so when left to long it will go flat

14

Student response 1

Student response 2

1. Because electricity is coming from both ends of the battery through the wires and then coming to the bulb and permitting it to light.
2. Add another battery
because there is more electricity to power the bulb
3. Because all of the electricity has been used up

15

Student response 3

1. Because the battery stores electricity and when the electricity passes down the wire it lights the bulb
2. You could shorten the wire
because you wouldn't need as much electricity to get to the bulb
3. Because the bulb would use up all of the electricity in the battery

16

Student response 2

Student response 3

図 6 III - 1 2 シンポジウムで紹介されたアンケートの回答内容⁵⁾

6 - 4 授業実践より

今回の授業実践では、静電気の仕組みはパワーポイントを用いて説明を行った。その際に、正電荷と負電荷のバランスや移動を図 6 IV - 1 や図 6 IV - 2 のような図（モデル）を用いて説明した。しかし、数珠モデルの正電荷と負電荷のモデル（図 5 - 4、5 - 5）を用いて表すことも可能であった。数珠モデルの正電荷と負電荷のモデルを用いて説明を行う方が、今後数珠モデルにつなげる際にスムーズに学習が進むと考えられる。

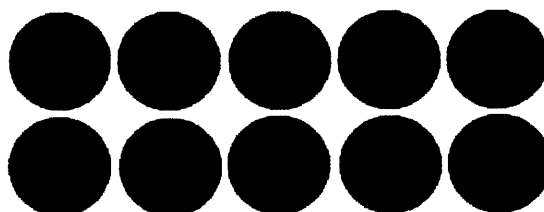


図 6 IV - 1 授業実践のスライドで用いた図①

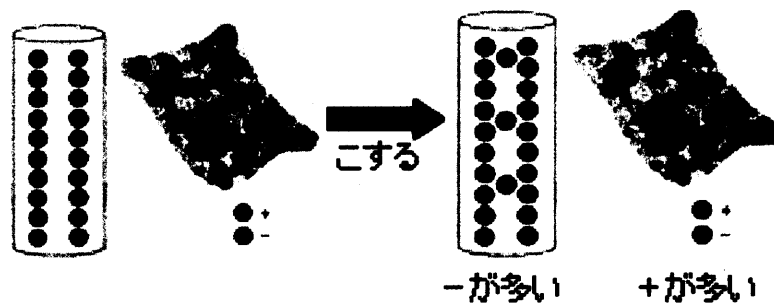


図6 IV-2 授業実践のスライドで用いた図②

ワークシートの中には、誤概念を持っていると考えられる生徒も含まれていた。例えば“+電子”という表現である。このことに関しては、マイナスの電気（電荷）を持っているものを“電子”と呼ぶということを強調すべきであったと言える。さらに“+電流”という表現を用いていたことに関しては、電流はプラスからマイナスに流れるものであるという概念からだと考えられる。今回行った授業実践では、回路学習にまで踏み込んでいないため、この概念の払拭には至らなかった。また、電荷に関して、電荷が移動することにより片方がプラスだけ、もう片方はマイナスだけの性質を持つと考えている生徒がいた。中学生には自由電子という概念がないため、移動することのできる電子と移動することのできない電子があるという発想には至らないと考えられる。しかし、小学校理科で電気を通すものと通さないものがあることは学習済みである。このような概念を持った生徒には、なぜ、電気を通すものと通さないものがあるのかということから、移動しやすい電子と移動しにくい電子があるのだということを理解させる。

また、ワークシートの記入で“シャボン玉に静電気が移るなんてすごい”という内容が多く見られた。これは、静電気の仕組みのすべての物質内部にプラスの電気（正電荷）とマイナスの電気（負電荷）が存在しているという説明の前に生徒が記述した内容であるため、授業後に概念がどのように変化したのかは捉えることができない。授業の目的に際した内容だけでなく、様々な概念に関する問いかけをアンケートに盛り込むべきであったといえる。

アンケート結果を見ると、授業実践の目的であった、電気の正体が電子であること、静電気と動電気の正体が同じだということに関しては多くの生徒の理解が進んだといえる。しかし、先述したように、授業の目的とは別の部分で誤概念を持った生徒がいたことも事実である。50分を2コマという短い時間で実践を行ったことも原因のひとつと言えるだろう。今回の実践結果を参考に、更なる改良を加える必要があると言える。

<6章 参考・引用文献>

- 1) 米村でんじろうサイエンスプロダクションHP ミラクルシャボン玉、
<http://www.denjiro.co.jp>
- 2) 永田一清、1987、初等物理シリーズ近角聰信監修 4 静電気、p.162-163、培風館
- 3) 柳沢健・内藤喜之・深尾正、1985、新版岩波ジュニア科学講座3 エレクトロニクス入門、p.2-87、岩波書店
- 4) 堤井信力、1998、ブルーバックス B-1213 静電気のABC 帯電の謎解きから防ぎ方、応用まで、pp.172、講談社、
- 5) フィル・スコット（リーズ大学）、2005、非専門教師支援のための物理教材、BRITISH COUNCIL 科学シンポジウム「世界物理年2005－科学に若者をひきつけるために」配布資料
- 6) 福島いずみ、2000、修士論文、理科教育における粒子概念の導入について－小中学校を対象とした教材研究と実践例－

7章 総括

1) まとめ

本研究では、以下のような教材を考えた

- ①電子を量的・粒子的な概念で捉えるため、光エネルギーから電気エネルギーへの変換を行う教材実験。
- ②熱エネルギーから電気エネルギーへの変換を行う教材実験は電子を量的・粒子的な概念で捉えるだけでなく、電荷のバランスにも注目できる。
- ③負の電荷を持った電子の一方的な流れだけでなく、回路内における電荷のバランスから、同時に正の電荷の流れも意識させるモデル
- ④中学校理科における、静電気を教材とした授業案。電荷のバランスと、静電気と動電気の正体が同じことを伝える。

③の正の電荷を考えるモデルは、将来の半導体における電気伝導の学習にも発展的に応用が可能であり、電流の場合の水流モデルでは捉えにくい、抵抗値の変化を簡単に捉えることが出来る。しかし、木製の球を動かしモデルを動作させる際、手で球を動かすためスムーズに動作を行えないという問題点がある。これは、今後の課題といえるだろう。

授業実践については、静電気を教材に電荷のバランスや静電気と動電気の正体は同じだということに注目させる授業案を作成し、実践を行った。アンケートやワークシートの記述から理解を深めた生徒が多くいたと考えられる。しかし、アンケートの自由記述欄に疑問を書いている生徒もあり、その質問に対して返答できなかったことが心残りである。

2) おわりに

この研究を進めていくにつれて、私自身が高校生の時になぜ電流の流れと電子の流れが逆なのか、という疑問を持っていたことを思い出した。長い間『理科』という教科から離れていたため、すっかり忘れていたのだ。高校生の頃はまさか自分が研究テーマに選ぶとは夢にも思っていなかったに違いない。同じような疑問を持った人たちが多くいることを知った。さらに、なぜ電流の流れと電子の流れが逆なのかという疑問を持った人が（本研究の中でも紹介したように）電流の向きをマイナスからプラスに変えようという唱えていることも知った。自分と同じような疑問を持つ人が多くいることを知ったことも、この研究の成果だったと言えるだろう。

最後に、学部時代を含めお世話になった芝原寛泰教授、長い間ご指導いただき、時には迷惑もかけたことと思います、本当にありがとうございました。さらに、授業実践を行わせてくださった附属京都中学校の方々、様々な助言を下された谷口和成先生、修士論文に敵的確な指摘をしてくださった広木正紀先生、たくさんの支えがあったからこそ今があると思います。本当にありがとうございました。

付録 (Appendix)

ゼーベック効果 [Seebeck effect] について

2種の異なる金属、または半導体を接合し、接点を異なる温度に保つと、回路中に電子が流れる。熱電効果^{注)} (金属または半導体中の熱の流れと電流とが相互に影響を及ぼしあう効果の総称)を表す現象でゼーベック (Seebeck.T) により、1821年に銅とビスマスまたはアンチモンについて発見されたのでゼーベック効果 (Seebeck effect) と呼ばれている (図 Appendix-1)。生じる熱起電力の大きさは、導体の材質が均一であれば、温度差によって決まる。この現象を利用して、温度測定を行う素子などもある (理化学辞典^{A-1)} 参照)。

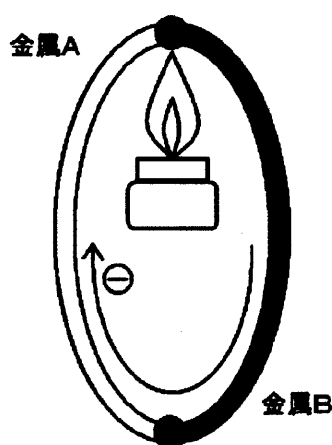


図 Appendix-1 ゼーベック効果 (熱電対に利用) ^{A-2)}

金属A : 起電力 大 金属B : 起電力 小

ゼーベック効果の逆の現象はペルチェ効果といわれ (図 Appendix-1)、異なる金属を接合した回路に電流を流したときに接点で発熱または吸熱反応が起こる現象である。

注) 熱電効果の原理^{A-3)}

金属内部には自由電子が存在する。金属の温度が高いと、熱エネルギーで自由電子の動きは活発になる。そこで、金属棒の一方を高温にしもう一方を低温にすると、自由電子の動きは、高温側では活発に低温側では不活発になる。動きが遅い低温側の自由電子は密度が濃くなり数が多くなる。また、動きが早い高温側の自由電子は密度が小さくなり数が少なくなる。このようにして、電子が多い低温側はマイナスに、電子が少ない高温側はプラスに帯電し、金属の両側に電位差が生じる。この電位差は、金属によって異なるため異種の金属の両端をつないで温度差を与えると、両者の起電力の差によって電流が流れる。

ペルチェ（ペルティエ）効果 [Peltier effect] について

異種の導体（または半導体）の接点に電流を流すとき、接点でジュール熱以外に熱の発生または吸収が起こる現象。フランスの物理学者ペルチェ（Peltier, Jean Charles Athanase, 1785.2.22－1845.10.27）が1834年に発見し、「ペルチェ効果」と命名された。電流の方向を逆にすれば熱の発生と吸収は反対方向になる（理化学辞典^{A-1)} 参照）。

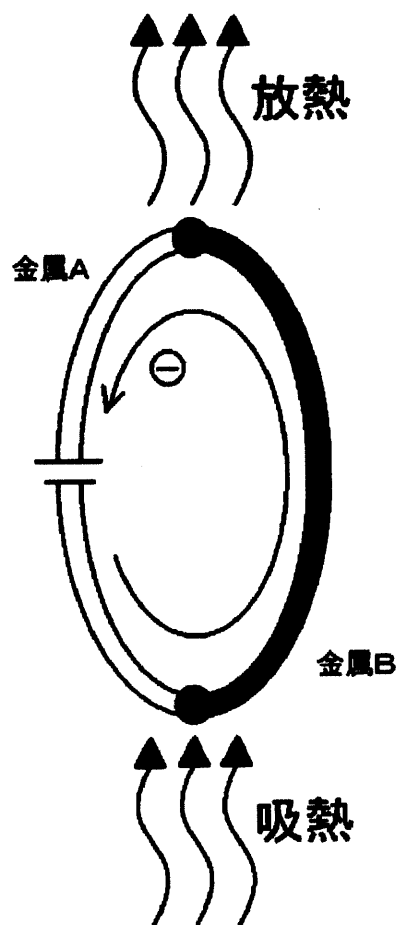


図 Appendix-2 ペルチェ効果（ペルチェ素子に利用）^{A-2)}

金属A：起電力 大 金属B：起電力 小

ペルチェ素子について

ペルチェ素子（ペルチェモジュール）に使用されている素材はビスマスとテルルの化合物でペルチェ効果が効率よく発現する半導体である¹⁾。

このペルチェモジュールは、ペルチェ効果だけでなく、セラミック板の両面に温度差をつけると熱起電力を発生する「ゼーバック効果」を観察することも出来る。

ペルチェ素子（ペルチェモジュール）について

1) ペルチェモジュールの構造

発電素子一個の形状は、n型のビスマス・テルル結晶とp型のビスマス・テルル結晶を銅板で接続した π 型構造である（図 Appendix-3）^{A-4)}。電極パターンを形成させたセラミック基盤の上に π 型素子を複数個直列に接続し、同様のセラミック基盤ではさんだものがペルチェモジュールである。

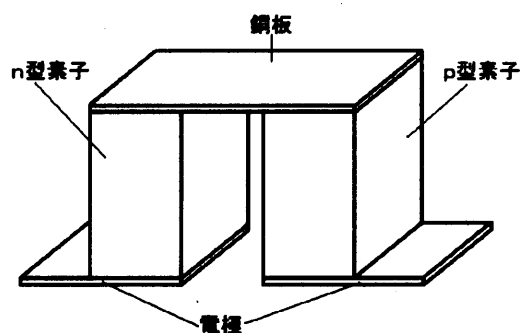


図 Appendix-3 発電素子一個の構造^{A-4)}

2) ペルチェ素子の起電力の発生について

熱は、格子振動と電子によって物質中を伝播する。言い換えれば、物質中を熱が移動している時には、電子（またはホール）も一緒に移動していることになる。ペルチェモジュールの上下面に温度差を与える事により、図 Appendix-4 のような電子（またはホール）の移動が生じ、n型素子およびp型素子内に電子（またはホール）密度のグラデーションが生じる^{A-4)}。

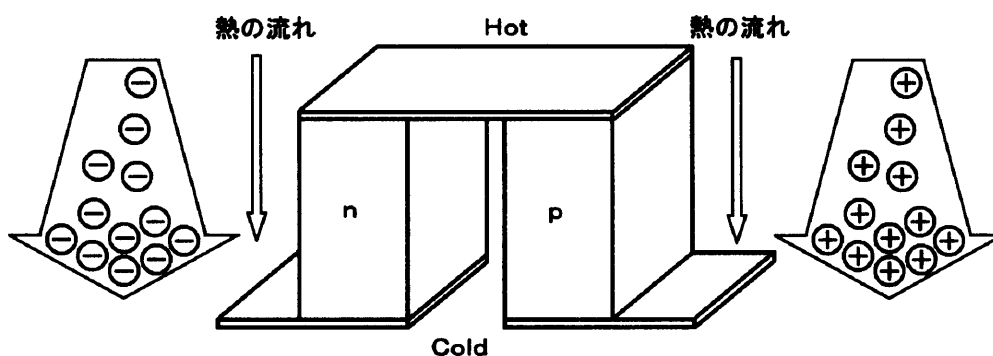


図 Appendix-4 起電力の発生原理^{A-4)}

n型：キャリアである電子が熱の流れに沿って低温側へ移動。

p型：キャリアであるホールが熱の流れに沿って低温側へ移動。

通常のペルチェ素子の実験方法について

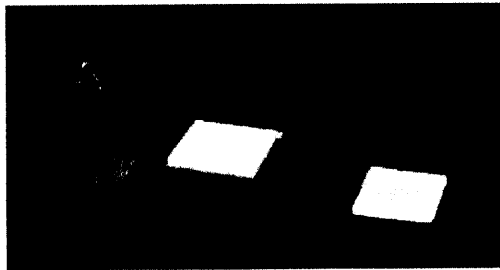


図 Appendix-5 ペルチェモジュール実験セット^{A-5)}

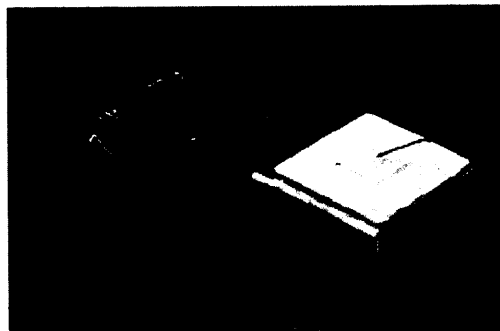


図 Appendix-6 放冷ファンを取り付けて実験を行う様子^{A-5)}

中学校理科の教科書の例

本研究の授業実践に関する中学理科 1 分野の静電気に関する箇所

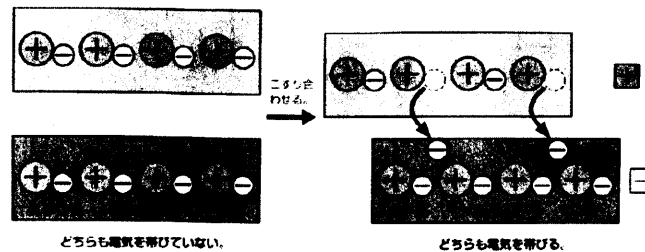


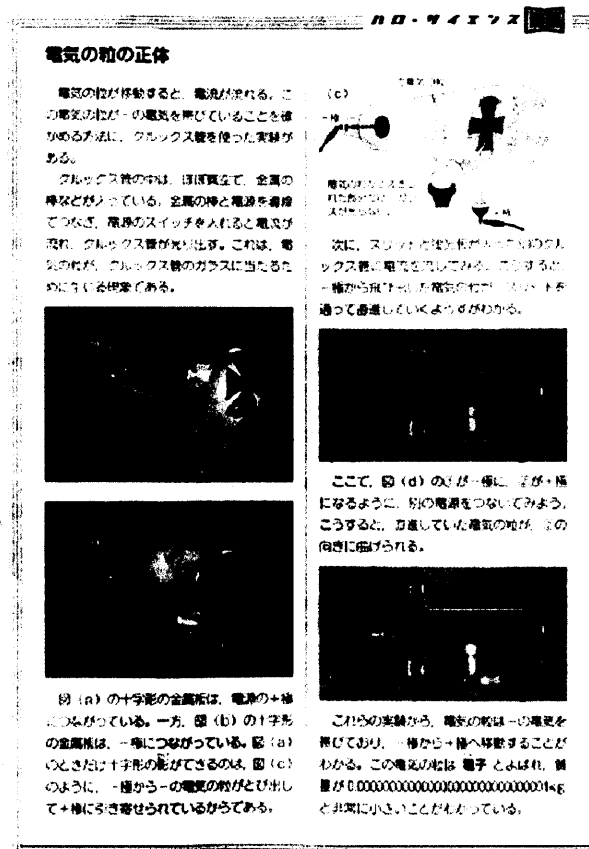
図5 静電気が発生するしくみ

物体をこすり合わせたときに静電気が発生するのは、**図 5**のように、 $-$ の電気の粒が移動するためである。

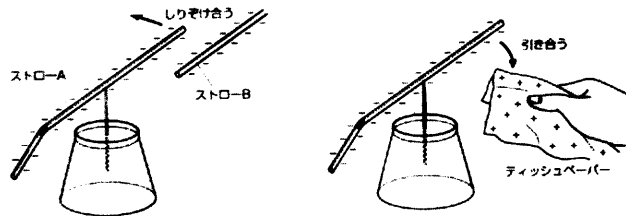
こすり合わせる前の物体は、 $+$ の電気の粒と $-$ の電気の粒を同数もっていて、全体としては電気を帯びていない。2種類の物体をこすり合わせると、 $-$ の電気の粒が一方の物体の表面から他方の物体の表面に移動するため、一方は $+$ の電気の粒が多くなり、もう一方は $-$ の電気の粒が多くなる。こすり合わせた物体は、こうして $+$ の電気や $-$ の電気を帯びるのである。

静電気の発生の予防

静電気によって、衣服が体にはりついたし、びりつと衝撃を受けたりすることがある。これをさけるためには、一の電気的物がたまりないようにすればよい。例えば、静電気防止用のスプレーをかけたたり、洗たくのときに柔軟剤を加えたりすると、一の電気的物がたまりにくくなるので、静電気の発生を防げる。



理科1分野上 教育出版 H17年2月10日検定済
(発展的なトピックスで電子という言葉が登場している)



実験1の結果

実験1から、電気をおびた物体と物体の間には、離れていても力がはたらき、引き合ったり、しりぞけ合ったりすることがわかる。このことから、電気にも、磁石のN極とS極は引き合い、同じ極どうしはしりぞけ合うような関係があることがわかる。

電気には、⁺の電気と⁻の電気の2種類があり、2種類の物体がこすり合わされて電気をおびるとき、一方の物体は⁺の電気をおび、もう一方の物体は⁻の電気をおびる。

+と+、または-と-のように、同じ種類の電気の間にはしりぞけ合う力がはたらき、+と-のように違う種類の電気の間には引き合う力がはたらく。

物体が電気をおびる原因

図2のように、ふつう、物体は⁺と⁻の電気を同じ量ずつもっており、⁺と⁻の電気が互いに打ち消し合って、全体として電気をおびていない状態になっている。

しかし、2種類の物体をこすり合わせると、一方の物体の⁻の電気の一部が他方の物体に移動する。そうすると、⁻の電気を受け取った方の物体は、全体として⁻の電気をおび、⁻の電気を失った方の物体は、全体として⁺の電気をおびることになる。

図192ページの写真で、物体どうしが、くっつき合ったり、しりぞけ合ったりするのは、物体が電気をおびたためである。

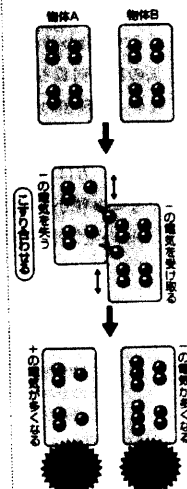


図2 電気をおびる原因

発展 ● 電流の正体—電子—

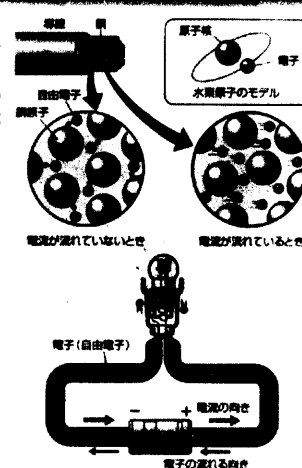
物質は原子とよばれる小さな粒子が集まってできている。原子は、さらに原子核と電子でできている。原子核は⁺の電気をもっており、そのまわりを⁻の電気をもった電子がいくつもまわっていて、原子全体としては、電気をおびていない状態になっている。

導線の材料である金属には、原子から離れて自由に動くことができる電子がある。この電子を自由電子という。

回路に電池をつなぐと、導線の電子（自由電子）がいつせいに電池の⁺極に引かれて動く。同時に電池の⁻極からは電子が次々と導線に流れ出す。

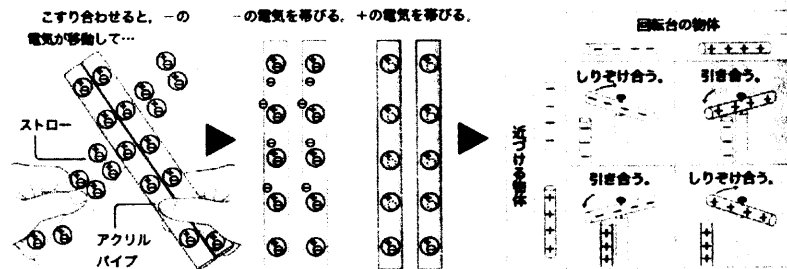
このように、導線の内部には、一極が⁺極へ向かって移動する電子の流れができる。

このときの電子の流れが電流である。電子の流れの向きと、電流の向きが逆になっているのは、電流の正体がわからない時代に、電流の向きを決めてしまったためである。



中学校科学1分野上 学校図書 H17年2月10日検定済
(発展的なトピックスで電子という言葉が登場している)

実験1では、ストローとアクリルパイプなど、物質の種類が異なるものをこすり合わせると、それぞれの物体に静電気が生じた。静電気を帯びたストローどうし、アクリルパイプどうしには、しりぞけ合う力がはたらき、ストローとアクリルパイプには、引き合う力がはたらいた。



④ 図3 静電気を帯びる物体

実験1の結果は、静電気に^{プラス}と^{マイナス}の2種類があると考え
ると、説明できる。初めは、それぞれの物体は、+と-の
電気を同数もっているため、どちらも電気を帯びていない。
2種類の物体がこすれ合うと、一方の-の電気が、もう一
方に移動するため、それぞれの物体に異なる種類の電気が
現れる。同じ種類の電気を帯びた物体どうしには、しりぞ
け合う力がはたらき、異なる種類の電気を帯びた物体どう
しには、引き合う力がはたらく。この力は、物体どうしが
はなれていてもはたらく。

新しい科学1分野上 東京書籍 H17年2月10日検定済
(発展的なトピックスでも電子という言葉は登場してこない)

ストローとシートを摩擦すると電気が生じる。電気には^{プラス}＋と^{マイナス}－の2種類がある。同じ種類の電気どうしでは反発する力がはたらき、ちがう種類の電気どうしでは引き合う力がはたらく。この力を**電気の力**という。電気★1の力は物体どうしがはなれていてもはたらく。

★1 磁石の力もはなれてはたらく力である。

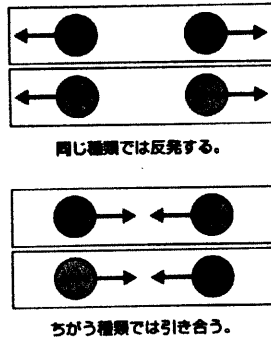


図1 電気★1の力

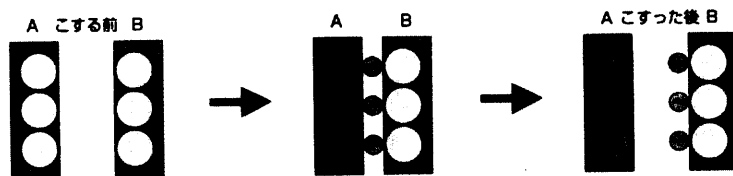


同じ種類の電気がたまると反発して広がるのだね。



ストローとシートをこすり合わせると、一方に＋の電気、他方に－の電気がたまる。ストローとシートでは、ちがう種類の電気がたまるから、たがいに引き合う力がはたらいなのである。また、ストローには同じ種類の電気がたまるので、ストローどうしにはたがいに反発する力がはたらいなのである。

摩擦によって生じる電気を**静電気**という。静電気は物質の中にある－の電気をもつ小さな粒が移動するために生じる(図2)。



中学校理科1分野上 大日本図書 H13年2月28日検定済 H15年2月5日 発行

(発展的なトピックスでも電子という言葉は登場してこない)

ティッシュペーパーとストローを摩擦すると電気が生じる。電気には $+$ と $-$ の2種類がある。同じ種類の電気どうしでは反発する力がはたらく。ちがう種類の電気どうしでは引き合う力がはたらく(図1)。この力を電気力という。電気力は物体どうしがはなれていてもはたらく。

実験1で、ティッシュペーパーとストローをこすり合わせると、一方に $+$ の電気、他方に $-$ の電気がたまる。ティッシュペーパーとストローには、ちがう種類の電気がたまり、たがいに引き合う力がはたらいしたのである。また、摩擦した2本のストローには同じ種類の電気がたまるので、ストローどうしにはたがいに反発する力がはたらいしたのである。

摩擦によって生じる電気を静電気という。静電気は物質の中にある $-$ の電気をもつ小さな粒(電子)が移動するため生じる(図3)。

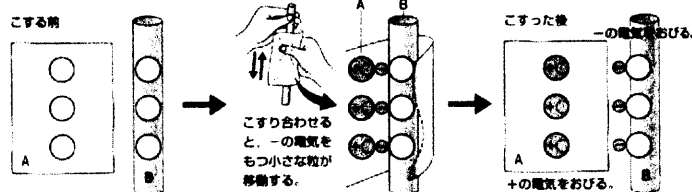


図3 静電気が起こる原因

電気が流れない二つの物質AとBをこすり合わせると、 $-$ の電気をもつ小さな粒が移動する。

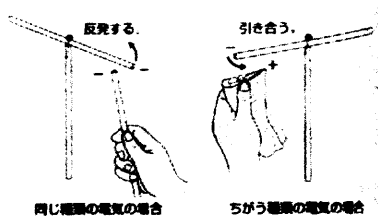


図1 電気力



図2 はく検電器

電気が生じているか調べる装置
(自作方法は自由研究p.150参照)

同じ種類の電気がたまり、反発して広がるのね。



★1 磁石の力もはなれてはたらく力である

★2 p.123参照

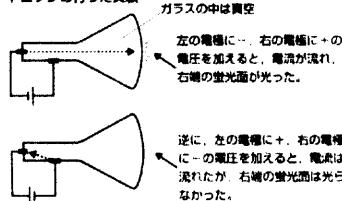
発見 陰極線と電子の発見

イギリスの物理学者J.J.トムソン(1856~1940年)は、1897年にブラウン管を用いた右図のような実験を行った。この実験結果から、一極から $+$ 極へ「何か」が飛んで行き、一部が蛍光面に達したと考えられた。この「何か」は、一極から出ることから「陰極線」とよばれた。

のちに陰極線は、 $-$ の電気をもつ粒の流れであることがわかった。この粒が電気を運ぶものであり「電子」と名づけられた。

電流の向きは、 $+$ の電気をもつ粒の流れとして決められた。したがって、電流の向きと電子の流れの向きは反対になる。

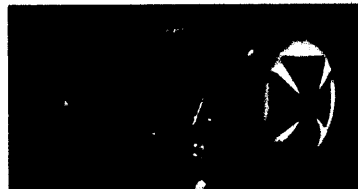
トムソンの行った実験



ガラスの中は真空

左の電極に $-$ 、右の電極に $+$ の電圧を加えると、電流が流れ、右側の蛍光面が光った。

逆に、左の電極に $+$ 、右の電極に $-$ の電圧を加えると、電流は流れたが、右側の蛍光面は光らなかった。



真空放電のようす 一極から飛んできた陰極線で蛍光面が光っている。十文字板で陰極線がさげられるために影ができています。

中学校理科1分野上 大日本図書 H17年2月10日検定済

(発展的なトピックスで電子という言葉が登場している)

＜参考・引用文献＞

A-1) 岩波理化学辞典 第5版

A-2) 藤瀧和弘、2004、図解入門 よくわかる 電気の基本としくみ 身近な機器から
から学ぶ電気の基礎、第5章 電気の化学作用と電池第、pp.251、秀和システム

A-3) 藤村哲夫、2002、ブルーバックス B-1367 電気発見物語 見えないものが、ど
のように明らかになったか、pp.254、講談社

A-4) ペルチェモジュール実験セット 取り扱い説明書 原理説明、中村理科工業

A-5) 中村理科工業株式会社 HP、<http://www.rika.com/>