

電圧概念の獲得への提案

赤澤 孝*

A Proposal for Facilitating the Grasping of the Concept of Voltage

Takashi Akazawa

The construction of a simple corpuscular model in the learners' minds helps them understand the concept of physics. The physical concept of electricity is difficult to learn in the course of students' limited daily activities, so some provisional introductions of the distinctive experiments and a simple corpuscular model, which enables the learners to form the concept of voltage, will work as necessary and useful support.

Keywords: 物理概念の把握、電圧概念、磁界指導、教育心理学、

1. はじめに

高校生や大学生が物理概念を理解する事は困難を要することが多い。力学の分野では、困難の原因が日常経験と物理法則との食い違いに依ることが多く、学習者は誤概念を持ったままとなっていることがしばしばある。それを解決する工夫も数多く報告されている¹⁾。一方電磁気学に関しては、日常経験から誤概念に至ることは少なく、むしろ電気に関するイメージそのものがない状態で、高等学校の物理では現象や公式の記憶が主体となっており、演習問題は解けるが、苦手意識を持っている生徒が多い現状である。また電流、電圧に関する概念としては、電圧を水の落差として理解し、電流は水の流れで、電池は水のくみ上げ機、コンデンサーは水のタンクとして理解するなど、いわゆる水流モデルで理解している生徒が多い。一方箔検電器の指導では粒子モデルを用いて指導し、生徒諸君もそれで一応納得出来ていると思っている。しかし、高校生、大学初年の学生に、乾電池や蓄電池における電圧の物理的イメージを描かせ、またそれがどのようなものに起因しているかを理解させることは困難な状況にあることが多い。電圧を理解させるための「水流モデル」は類推しやすい利点はあるが、粒子モデルと水流モデルをそれぞれ使いやすいくところへ使うことが多いため、かえって分からなくなってしまう生徒や学生に遭遇することが多い。学生諸君より聞いた混乱の原因は、要約すると

- ① 水をくみ上げるためのポンプを動かすエネルギーはどこから来るのか。これに対応する電池の起電力に関しては明示されていない場合が多い。しかし、水流モデルの場合、生徒はむしろこの起電力の方に注目してしまいやすい。

* 教養部

② 乾電池や蓄電池の電圧は最初は一定であるが、一定の電力使用後低下するのはどう説明するか。

③ 抵抗体へのエネルギー授与をどう説明するか。等があげられる。

結局「電圧は水圧のようなもの」としてのとらえ方しかできず、単に電圧は電流と抵抗値をかけたものとして暗記してしまう生徒が多い。これらの結果数多く存在する非オーム性の現象に対する理解が遅れ、また交流を学ぶ場合にも、電子がプラス極とマイナス極を往復するというイメージにつながりやすい等多くの困難に直面する。

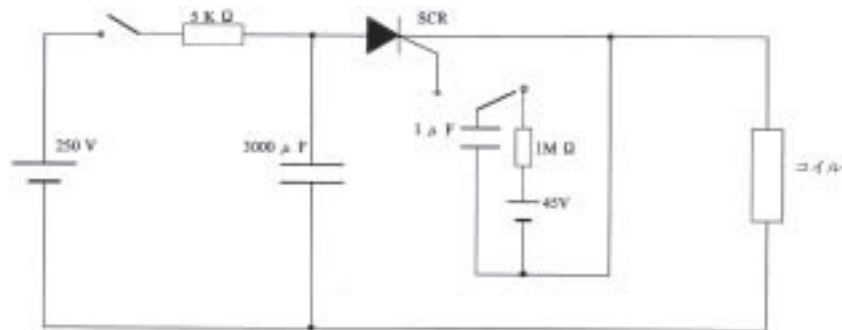
このような弊害をなくすため、粒子モデルを用いて、幾何学的条件が簡単で、しかも複雑な化学反応を伴わない、電荷が一様に分布するコンデンサーを用い、イメージを描きやすくする簡単な図を用いて学習させるプランを立てた。このプランは、従来の指導方法を併用しているものである。即ち、物理Ⅰで水流モデルを学び、物理Ⅱの磁場の学習までを終えた後、再度電圧を指導することとした。そして、ある程度の学習を積んでいるが結局良く分からないという状態の生徒を対象としている（この状態の生徒がほとんどである）。つまり高校3年生、大学1年時を対象としている。この段階で大きな容量のコンデンサーを用いて大電流をつくり、それにより教科書通りの実験を実施し、そして電圧、コンデンサーのエネルギーを指導するのである。この方法を実際に高校3年生、大学生に実施したところ、はじめてイメージを持てたという感想とともに、電磁気学に興味を持てたとの感想が、ほとんどの生徒、学生から聞かれたので報告する。

2. コンデンサーを用いて実験室内で大電流を作る方法と磁場についての実験

物理Ⅰの多くの教科書では、静電気、電流(ここでは水流モデルを用いている)、磁場、交流、電波を学んでいる²⁾。次に物理Ⅱでは電位、コンデンサー、オームの法則、電流と磁場の順で学んでいる³⁾。物理Ⅱの電流と磁場を指導する段階では、直流電源や、乾電池などを用いた実験では、磁場の様子や電流の相互作用などを明確に観察することが出来にくい。また、この段階においても相当理解していると思われる生徒でも電圧について物理的イメージを作ることが出来ていないことが多い。既にこの段階で、その構造や働きについて理論的には説明してある大容量のコンデンサーを提示し、そのコンデンサーを用いて大電流を作り出し、写真でのみ示されていることの多い磁場の様子を提示し、あるいは電流による磁場の存在をはっきりと見せ、次にそのコンデンサーで電圧概念の指導を実施することを行うことが効果的である。

高等学校物理、電磁気学の教科書には、電流の作る磁場、電流と磁石の相互作用が写真で示されている。それらを実際に演示しようとする、弱い電流では現象そのものを明瞭に示すことが出来ないが、図1のように、大容量のコンデンサーとサイリスからなる回路を用いるなら実験室内で容易に安全に数百アンペアの電流パルスを作り出せる⁴⁾。

図 1 パルス大電流発生装置



大電流を用いれば、図 2～図 4 に示すように、直線状電流作る磁場、円形電流の作る磁場、ソレノイド電流の作る磁場を簡単に示すことが出来る。いずれも一回の放電でこのような教科書通りの磁界の様子が観察され、しかも音をたてて鉄粉が動くので、生徒、学生諸君には印象的なものとなる。

更に、極めて大きな電流であるので、電流同士の相互作用、電流と磁石の相互作用を明瞭に見せることが出来る。特に、この電流を励磁用コイルに流し、コイルの入り口にクギ等強磁性体を置くと、コイルに発生させた瞬間的な磁場により、クギは教室の前から後ろまで(10m以上)も飛び出す。これらの実験はとても印象的であり、生徒達の好奇心を駆り立て、何故だろうと考えはじめる動機付けに十分なものである。



図 2 円形電流の作る磁場の様子



図 3 直線状電流の作る磁場の様子



図5 ソレノイドを流れる電流がつくる磁場の様子

3. コンデンサーを用いて電圧概念を指導する

電圧の定義として、多くの教科書では次のように述べられている。「1クーロンの正電荷を基準点 A から対象とする点 B に移動させるのに必要なエネルギーが V ジュールならば、その BA 間の電圧を V ボルトと呼ぶ」。しかしながらこの定義のみで電池の電圧を初学者に理解させることは困難である。それ故、この定義をより具体的に次のようにして指導する。「1クーロンの負電荷が基準点 A から対象とする点 B に移動したときに、その回路の構成物に与える、あるいははき出すエネルギーが V ジュールであるとき、BA 間の電圧を V ボルトと呼ぶ」。この定義を採用することにより、電子1個 ($-e$ クーロン) が V ボルト電圧のある、A から B に移動するならば eV ジュールのエネルギーを回路の構成物に与えるということも比例式を用いて容易に導入することが出来る。また電圧というものはエネルギー概念より出発しているものであることも理解させることが出来る。

物理Ⅱの教科書では、静電気力からクーロンの法則、電場、電位の定義を行い、点電荷の周りの電位について理論的に示している。ここでは点電荷の大きさにより周りの電位の大きさが異なってくるのである。そして電位の差として電圧を定義しているのである。しかし、このことを教室内での実験で示すことはとても難しい。2 で使用している大容量のコンデンサーを用いるなら、コンデンサーの極板間の電圧は、極板に蓄えられた電荷量に比例することを容易に実験で示すことが出来る。図6に示す回路において、スイッチ S をオンにすると、充電抵抗 R を通して電流即ち電子の流れが発生し、極板 A に電子がたまってくる。その結果静電誘導により B の極板にプラスの電荷が発生する。流れ込んだ電流を積分したものが電荷である故、スイッチをオンにしてからの時間とともに電圧が次第に大きくなることを確認させることが出来る。つまり電荷の増加によって電圧が発生することを理解させることが可能である。実際には図6のように直流電源を用いて、コンデンサーの両極板に電荷を蓄えることより出発するのであるが、このことは粒子モデルで考えると図10-aのように互いに引き合って、電氣的に中性になっている荷電粒子を図7

—b のように分けることを意味している。

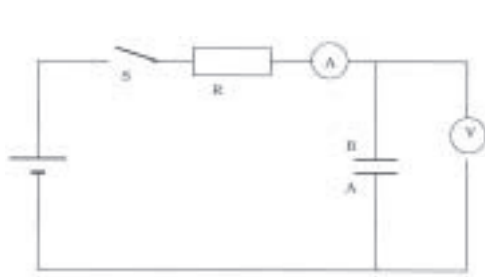


図6 電圧は電荷に比例することを示す
実験の回路図

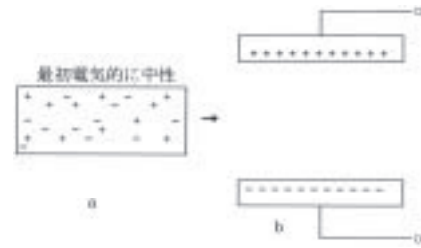


図7 — a , b 電氣的に中性であった
ものが+極板と-極板に分かれ
ることを示す模式図

また、電圧はエネルギー概念であることは、図8の回路において、コンデンサーCを V_0 ボルトに充電し、しかる後スイッチ S_2 を入れる。すると、コンデンサーにたまっている電子が抵抗体にエネルギーを与え、抵抗体が熱を発生する。この時 V_0 の値を色々変えたり、あるいは充電する時間を変え、コンデンサーに蓄えられる電荷の量を変えれば、抵抗体に発生する熱量も変わる。この時発生する熱量を測定することは容易ではないが、演示実験としては手で感じられる違いで十分であろう。このことを通して、電圧の差は手で感ずることが出来る熱エネルギーの差であることを理解させることが出来る。

大容量のコンデンサーからの放電により、電位差の違いがエネルギーの違いであることが、手で感じる熱として理解する事が出来るが、このことを粒子モデルで説明する。平行平板コンデン

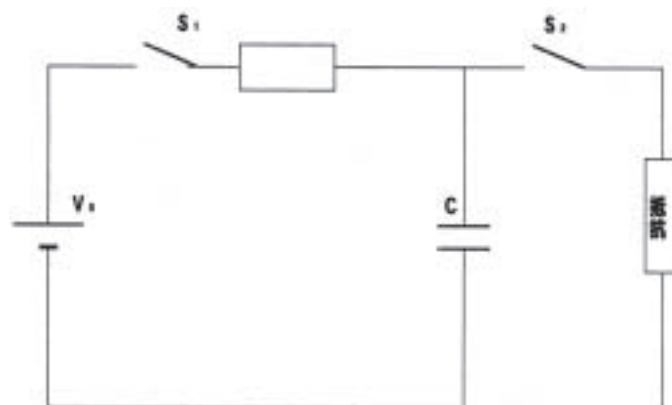


図8 コンデンサーの充電電圧を変えることにより、
抵抗体に発生する熱量の違いを見る回路。

サーの両極板にそれぞれ $+q$ ($=+Ne$) クーロンと $-q$ ($=-Ne$) クーロンの電荷が存在す

るならば、両極板の間には電荷に比例した電圧が発生する。即ち

$$V = k q = k N e$$

ここで比例定数 k は幾何学的条件に依存するものであり、平行平板コンデンサーの場合は $k = \delta / \epsilon S$ で与えられる。ここで δ は極板間の距離、 S は極板の面積、 ϵ は誘電率である。即ち電圧 V は

$$\begin{aligned} V &= (\delta / \epsilon S) N e \\ &= (\delta / \epsilon) (N e / S) \end{aligned}$$

で与えられる。この式は電圧は電荷密度に比例することを意味している。

コンデンサーの両極板に $\pm N_0 e$ クーロンの電荷を充電した後、抵抗体を接続すると、電子は次々とマイナス極から飛び出し、抵抗体を構成する原子と完全非弾性衝突を繰り返すことにより原子に運動エネルギーを与え、プラス極板に吸い込まれる。すると、極板状上の電荷が次第に減少し、それにともなう電圧も減少する。従って 1 個 1 個の電子が抵抗体に与えるエネルギーも次第に減少する。最初の 1 個が抵抗体に与えるエネルギーを W_1 とすると

$$W_1 = e k (N_0 - 1) e$$

同様に 2 番目、3 番目、 \dots N_0 番目の電子が抵抗体に与えるエネルギーは次のように表される。

$$W_2 = e k (N_0 - 2) e$$

$$W_3 = e k (N_0 - 3) e$$

.

.

.

$$W_{N_0-1} = e k (1) e$$

$$W_{N_0} = 0$$

これらのエネルギーの総和 W_0 のように表される。

$$\begin{aligned} W_0 &= W_1 + W_2 + \dots + W_{N_0} \\ &= e k (N_0 - 1) e + e k (N_0 - 2) e + \dots + e k (1) e \\ &= e k e (N_0 (N_0 - 1) / 2) \end{aligned}$$

$N_0 \gg 1$ のとき

$$W_0 = e k e (N_0)^2 / 2 \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

となる。①式はコンデンサーの初期条件 $q_0 = N_0 e$ 、 $V_0 = k N_0 e$ を用いて表すとつぎのようになる

$$\begin{aligned} W_0 &= (1 / 2) q_0 V_0 \\ &= (1 / 2) C (V_0)^2 \end{aligned}$$

以上のように、粒子モデルのみを用いてコンデンサーのエネルギーを電圧を用いて計算できる。多くの教科書は、電荷をあたかも連続体とみなして、コンデンサーに蓄えられたエネルギーを区分求積法で求めているが、上記の説明は、電子 1 個 1 個に注目したものである。

4. 起電力についてコンデンサーを用いて指導する。

「起電力とはいったい何なのか」という学生の質問(このような事を質問することがとても恥ずかしくて出来ないという困惑した態度を示しながらそれでもあえて行ってきた。これは教育心理学の物理概念の把握についての講義中の出来事であった。)にたいし何とか簡潔に答えようと考え、これもやはりコンデンサーを用いて説明を行った。先に電圧は極板状の電荷密度に比例することを述べた。コンデンサーの両極板を抵抗でつなぐと、電子が移動し中和がおこり、それぞれの極板の電荷密度の減少が生じ電圧が下がる。ところで図9に示すような正及び負電荷を供給する源がもし存在するならば、中和によって減少した電荷を補給し、電圧を一定に保つことができる。この電荷を補給する能力が起電力である。乾電池や蓄電池は正、負の電荷密度を化学変化によって一定値に保つように工夫されたものである。ここで起電力は乾電池や蓄電池を構成する物質に依存するものである。このようすを図10に模式的に示す。

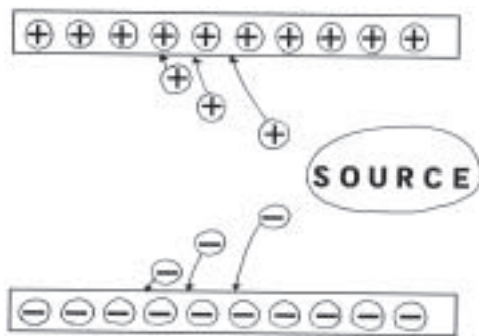


図9 電圧の発生を示す模式図

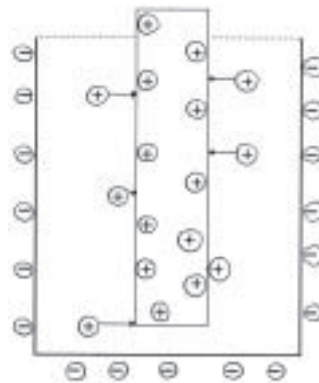


図10 乾電池の電圧の発生を示す模式図

電気の本性が電子という微小粒子であるので、電気を水でイメージするような連続体としてでなく粒子モデルで考える。図11で1個目の電子が移動するのに必要なエネルギーは

$$W_1 = 0$$

2個、3個・・・N個目は(Cはコンデンサーの容量)

$$W_2 = e^2/C$$

$$W_3 = 2e^2/C$$

・

・

・

$$W_N = (N-1)e^2/C$$

N個を移動するのに必要なエネルギーW

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_N$$

$$\begin{aligned}
&= 0 + e^2/C + 2e^2/C + \cdots + (N-1)e^2/C \\
&= (e^2/C)(1 + 2 + \cdots + (N-1)) \\
&= (e^2/C)(N(N-1)/2) \\
&= (e^2/C)(N^2/2) \quad (N \gg 1)
\end{aligned}$$

以上の説明は、コンデンサーに蓄えられていたエネルギーをはき出すときとは全く逆の説明であるが、電子一粒一粒の動きと、そのための仕事、エネルギーを示し、なおかつ簡単な模式図を用いた。これらはとても簡単なモデルであるが、実際に教室で用いてみると、生徒、学生にとってとてもわかりやすい説明であることがわかった。物理概念を説明するためには、具体物を対応させられるものは、色々教材を準備し、実験し、体験させることにより概念をもち理解させることが出来る。しかしおよそ目にするものの出来ないものは、粒子モデルのように簡単なモデル化により説明していくことが、それによって生じている現象を鮮明に示すことと同時に大切な事である。本報告はその1例である。

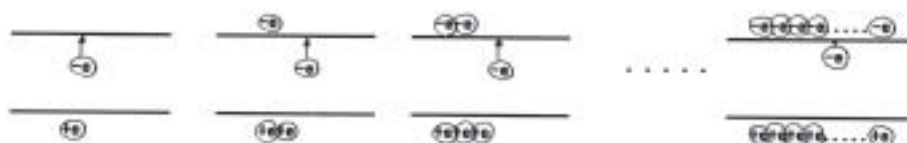


図11 コンデンサーを充電する模式図

5. 生徒、学生諸君の本実験、概念説明に対する評価

①磁界の実験について、生徒の感想の主なものを示す。

- ・従来の同様の実験は、結果がはっきりと見えないものであったが、はっきりと結果の出る感動を味わえ、理解できました。
- ・教科書などの写真で見るとよりも実際に実験をみるとわかりやすかった。
- ・理論ばかりでありイメージの湧かなかった内容のところが多かったのですが、目の前で示されると、納得出来るものになった。
- ・教科書の中でしかみることの出来なかった実験を間近でみる事が出来たのは貴重な経験でした。釘がコイルに吸い込まれ、勢いよく飛び出した時は（磁石ロケット）歓声を上げてしまいました。
- ・平行電流の実験は始めて見たので驚きでした。面白い実験でした。

- ・これほど結果が良く分かる実験はしたことがありませんでした。とても勉強になりました。
- ・今までつまらないと思っていた電気の分野で感動しました。
- ・自作の装置は言いようもなくすばらしく、分かりやすかった。

②電圧概念獲得の粒子モデルについて生徒の感想の主なものを示す。

- ・理解とイメージが大事だと思う。教科書や参考書だけではなかなかイメージしにくい事柄も、実験を通せば理解しやすくなると今回改めて感じました。
 - ・電気の分野は力学と違って現象を予測したりすることが難しく、なかなか得意になることが出来ませんでした。
 - ・モデル図を使って説明を受けたため、非常にイメージをつかみやすかった。
 - ・電気は力学と違い、目で見る事が出来ないから、正直理論を頭に詰め込んでいるような感じだった。今日の授業を聞いて、もっと勉強しようと思った。
 - ・先生の粒子モデルの説明でただ暗記していた公式の意味も少し分かりました。
 - ・コンデンサーに蓄えられるエネルギーについて、1粒1粒の電子に着目した考え方にはとても納得しました。
 - ・教科書の公式を粒子モデルを基に、導き出しているのは驚きでした。
 - ・粒子モデルに説明になると、教科書だと電流の解釈が上手く出来なかったのですが、一つ一つの電子の動きを見ることで自然と理解できる感じがしました。教科書の区分求積法では、積分に苦手意識のある自分ではどうにもいかずといった感じでしたが、このように図の解釈だと自分でも理解に苦しむことはなかったです。
 - ・コンデンサーのエネルギーの公式は、いままでの授業では原理が理解できなかった。しかし、このモデルでその公式が電子の移動によって説明出来るのだと分かった。
 - ・教科書の公式を粒子モデルを使って導き出す方法を知り、とても理解が深まった。
- 以上のように、磁界の存在を明確に示すドラスティックな実験と、とても単純化した粒子モデルの使用は、電圧概念の獲得、電気への動機付けに有効なものである。

6. 謝辞

本研究を進めるに当たり、ご支援ご協力頂いた、大野東高等学校校長 渡辺徹也先生、藤島高等学校 山内康司先生、酒井千春先生に感謝申し上げます。

7. 文献

- 1) 鈴木 亨：誤概念を支える因果スキーマ，物理教育 56－1（2008）pp10-15
- 2) 国友正和他：改訂版高等学校 物理Ⅰ，数研出版
- 3) 国友正和他：改訂版高等学校 物理Ⅱ，数研出版
- 4) 石金益夫，赤澤 孝，堀辺稔：強いパルス磁場による種々の演示実験，福井大学教育学部紀要Ⅱ-32（1983）

（平成 23 年 3 月 31 日受理）