# 逆動作可能なデバイスを用いた 電流の向きについての教員養成の試行

加藤徹也1)\* 西村浩隆2)

1)千葉大学・教育学部 2)千葉大学大学院・教育学研究科・修士課程

Tentative Pre-service Teacher Education of Current Direction Using Reversible Devices

KATO Tetsuya<sup>1)</sup> NISHIMURA Hirotaka<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Faculty of Education, Chiba University, Japan

<sup>2)</sup>Graduate School of Education, Chiba University, Japan: Master Course Student

近年小学校理科で実感を伴う理解を重視する活動として、手回し発電機やコンデンサー、LEDが利用されるようになった。これらは電流の向きに敏感なデバイスである。一方、歴史的には、電流という概念は実態と異なる理想化された概念であって、意図的に導入されたものである。小学校教育ではその特性から、理解を留保しながら活用を進めるという特別な扱いが必要である。このことを教員養成の場で体験させるべく、また特に、電流の向きを深く考察させるために、逆動作可能なエネルギー変換デバイス(手回し発電機と発光ダイオード)でのエネルギー消費と供給の両側の動作を組み合わせた講義や実験を行った。これらのデバイスで逆動作が起きる原理や、歴史上電流概念が確立していく過程において、電流がどのように扱われているかについても触れる。

In activities of recent elementary school science, handy generators, capacitors and light emitting diodes (LEDs) are utilized in order to encourage children to understand nature with practical responses. They need to think about the electric current directions when they try to apply electric current to these devices. However, in similar to the development in history of electricity, the concept of current should be developed intentionally with abstraction and idealization of the reality. Thus in the elementary school, a special treatment should be done prior to get accustomed to use the idea, such as to reserve ambiguities of full understanding of it. Therefore, we developed lecture and laboratory themes for pre-service teachers in our faculty to specify the meaning of the concept of electric current by introducing reversible devices of energy transformation, i.e., handy generators and LEDs. In this paper, we explained the mechanisms of reversibility of these devices and also summarized the history of development of the idea of the electric current by great physicists as natural philosophers.

キーワード:物理教育 (physics education) 電流概念 (the concept of electric current) 手回し発電機 (handy generator) 発光ダイオード (light emitting diode) 可逆エネルギー変換 (reversible energy transformation)

## 1. はじめに

小学校理科では実感を伴う理解が重視されるようになり、エネルギーに関する手応えを感じ取ることができる手回し発電機を用いた活動が盛んに取り上げられている。また、身近な生活の中で電気エネルギーを蓄積したり放出したりする充電式電池(二次電池)が多く使われるようになり、電子機器類の低電圧化という技術の進展に呼応するエネルギー蓄積デバイスとしての大容量の電気二重層式コンデンサーも子どもの活動の中に取り込まれるようになった。さらに、発光デバイスも無駄なエネルギー消費を抑制できるものに置き換えられ、白熱電球の代わりに発熱量の小さなLEDが生活の中で利用されて

いる。これに合わせて学校の理科教科書の中にも豆電球 とともにLEDが使われるようになった。

高機能で信頼度が高いにもかかわらず大量生産され低価格である新しいデバイスが登場すると、従来の製品と置き換えられ、生活も変化する。このような技術の進展は日々加速していて、後戻りすることはない。学校教育を受けている子どもたちが成人し社会を牽引する時代には更に変わっているだろう。理科教育もその変革のプロセスに追従していく必要がある。

ところが新しいデバイスは、最適な設計により単一の低電圧直流電源で稼動し小型であることを実現するため、素子の内部構造は必ずプラス・マイナスが非対称の電気回路として構成されていて、電流の向きを間違えると正しい動作をしない。LEDは点灯しない、電子オルゴールは鳴らない、といった単純明白な応答をする。コンデンサーは電気容量の減少や内部抵抗の増加により温度が

\*連絡先著者:加藤徹也 Corresponding author: 高くなって寿命が極端に短縮され、さらには有害な電解液が漏れたり破損したりする。悩ましい応答を示すだけで気づかないうちに危険なものになるものもある。また、最近のデバイスは保護回路により気にしなくても良いものも多いが、一般に直流回路を扱う場合は、電流計や電圧計を接続する際など、電流の向きへの注意を喚起すべき場面は少なくない。

このように、小学校理科で実感を伴う作業をさせようとするなら、電流の向きが問題になる事態は多い。しかしながら、電流とは何なのかをはっきり説明するのは不可能である。負の電気をもつ電子、あるいは正の電気をもつ粒子の流れというような説明は説得力がないばかりか、正しい電流の概念とはかけ離れた議論を生み出す原因にもなりうる。電流は、小学校理科で化学内容に粒子のモデルを使うこと以上にデリケートな扱いが必要な、抽象的なモデルである。物理学では、概念をわかりやすく説明するためのモデルをイメージ化したものという意味あいで「描像」ということばを使うことがあるが、小学校で扱う電流もそのような描像といえるだろう。そして、電流の最も決定的な性質がその向きである。

本論文では、この「電流」というモデルがどう理解さ れているか、特に、定義には曖昧さが残りながら「向き」 という性質を明白にもつという点について、歴史的にど う理解されてきたか、あるいは物理の学習者にどう教育 していくのが良いかについて、状況を整理し試行したこ とを報告する。まず第2章で小学校理科での扱いを総括 する。第3章では電圧や電流の概念が形成されていく歴 史の中で、大科学者たちは電流についてのどのような自 然哲学を行っていたかに注目する。第4章・第5章は電 流の向きを深く考える必要があるような、電気エネル ギーの消費と供給の両方の動作をひとつの構造に併せ持 つデバイスの各動作を考える。第4章は電動機(モー ター) あるいは発電機 (ジェネレーター), 第5章はLED あるいは光電池を取り上げる。第6章として、小学校理 科から高校物理までの教員養成に携わる立場から、電流 の向きの意味を再認識させる授業あるいは実験の試行に ついて紹介し、第7章で全体の総括を行う。

## 2. 小学校学習指導要領・教科書での「電流の向き」

## 2-1 関連する学習内容の確認

文部科学省『小学校学習指導要領解説理科編』における小学校理科でのエネルギー(物理分野)の内容の中で、電流に関連したものを表1にまとめた。いずれも前学年の内容を基礎として次の学年へ接続されていることがわかる。また、「電流の向き」という概念は第4学年から登場する。第4学年に電気の働き(電池の向きにより電流の向きが変わること)、第5学年に電流の働き(電流の向きが変わると電磁石の極が変わること)、第6学年に電気の利用(手回し発電機などでLEDを発光させ電流の向きを捉えること、一部のコンデンサーには極があることなど)がある。

特に、平成20年の学習指導要領の改訂により、第6学年ではLEDやコンデンサーなど特定の回路素子の扱いが含まれるようになった。そこで、第4・5・6学年で

#### 表 1 小学校理科エネルギー(物理分野)における電流

第3学年:電気の通り道

・電気を通すつなぎ方 ・電気を通す物

第4学年:電気の働き

・乾電池の数とつなぎ方 ・光電池の働き

第5学年:電流の働き

・鉄心の磁化、極の変化 ・電磁石の強さ

第6学年:電気の利用

・発電・蓄電 ・電気による発電 ・電気の変換 (光, 音, 熱などへの変換)

・電気の利用(身の回りにある電気を利用した道具)

の手回し発電機、LED、コンデンサーなどを扱う際、 回路に流れる電流の向きについてどのような扱われ方を し、どのように言及されているのかを、学習指導要領の 本文と解説および教科書を参照して具体的記述を確認す る。

## 2-2 学習指導要領と教科書における具体的記述

#### (1) 小学校学習指導要領 本文

学習指導要領本文の中で「電流の向き」について言及しているのは、第5学年「A(3) 電流の働き」のみである。ここでは「ア 電流の流れているコイルは、鉄心を磁化する働きがあり、電流の向きが変わると、電磁石の極が変わること。」を内容としてあげている。一方、他の学年には「電流の向き」に関する言及はみられない。

#### (2) 小学校学習指導要領 解説編

第2節第4学年「A(3) 電気の働き」では「乾電池の向きを変えるとモーターが逆に回ることから、電流の向きについてもとらえるようにする。」と記述されており、簡易検流計などを用いて電流の向きを調べることになっている。この記述からわかるように、ここで初めて「電流の向き」という概念が登場する。また、乾電池の向きとモーターの回転方向、電流の向きを「関連付け」てとらえることは、第4学年において育成すべき問題解決能力にも一致する。さらに「電流の向きを確認する際には、発光ダイオードが電流の向きによって点灯したり、点灯しなかったりすることを用いることが考えられる。」といった記述が見られ、LEDは電流の向きを確認するために使用できることが示されている。

本文で唯一「電流の向き」に関する記述が見られた第3節第5学年では、本文と同様に「電流の向きを変えると電磁石の極が変わることをとらえるようにする。」といった記述がみられる。電流の向きを変えるということは第5学年において育成すべき問題解決能力である「条件制御」にも通ずる。

第4節第6学年「A(4) 電気の利用」には蓄電器が触れられていて、「扱う対象としては、電気を蓄えるものとして、例えば、コンデンサーなどの蓄電器が考えられる。」とある。また、手回し発電機やLEDについても活動の例にとりあげられていて、「手回し発電機などを使って、電気をつくりだしたり、蓄電器などに電気を蓄えたりすることができることを、豆電球や発光ダイオー

ドの点灯やモーターの回転によってとらえるようにする。」とあり、これらは電流の向きをとらえるべき活動といえる。この活動は、すでに知っている回路素子の応答からそれに電気が蓄えられていることを「推論する」という、第6学年において育成すべき問題解決能力にも一致する。

#### (3) 各社の小学校教科書

学習指導要領解説で見てきた箇所について東京書籍, 大日本図書,学校図書,教育出版,啓林館の出版した教 科書を例に,実際の扱いを見ていこう。なお,市販され ている理科教科書はこれらの他に,信州教育出版『楽し い理科』がある。

各社の教科書で使われている単元名はほぼ共通している。第4学年の単元名は大日本図書のみ「電池のはたらき」で、その他の会社はすべて「電気のはたらき」であった。第5学年での扱いは、電流に着目するもの(「電流

がうみ出す力」など)と、電磁石に着目するもの(「電磁石の性質」など)に分かれる。第6学年については啓林館のみ「発電」という語句を使用している(「発電と電気の利用」)が、「電気の利用」「電気とわたしたちのくらし」「電気の性質とはたらき」といった単元名となっている。

ここでは一例として、大日本図書の教科書での具体的な記載内容を表2にまとめた。また、各社の教科書の記述内容を総括し対比したのが表3である。ここで注目したのは、第4学年の電流の向き(接続された電池の極にもとづく定義)、LEDの接続のときの端子の向き、第5学年の電流の向きと電磁石の極の関係、第6学年での手回し発電機と電流の向き、LEDの端子の向き、電子オルゴールの端子の向き、コンデンサーの端子の向きである。

第4学年での電流の向きについては、大日本図書以外

#### 表2 小学校教科書 大日本図書『たのしい理科』より

1 かん電池のはたらき

? モーターの回る向きをかえるには、どうすればよいのだろうか。

#### 実験1

- 第 ① 自分でつなぎ方を考えてモーターを回し、モーターの回る向きを調べる。
- 4 ②かん電池の向きを反対にしてモーターを回し、モーターの回る向きを調べる。(p. 25)
- ⇒ →かん電池の向きを反対にすると、モーターはぎゃくに回る。
- 毎 回路を流れる電気のことを電流という。じっけん1のけっかから、電流には向きがあることがわかる。(p. 26)

しりょう りかのたまてばこ 発光ダイオード

発光ダイオードの光らせ方

発光ダイオードは豆電球とちがって+きょくと-きょくの線が決められています。逆につなぐと光りません。(p. 35)

- 第 1 電磁石の極
- 🛂 | ?かん電池の繋ぎ方を反対にすると,電磁石のN極やS極はどうなるのだろうか。(p. 25)
- --年 | →電流が流れる向きを反対にすると,電磁石のN極とS極は反対になる。(p. 26)
  - 1 電気と光や音
  - ? 手回し発電機で起こした電気は、かん電池などの電気と同じようにはたらくのだろうか。
- 第 実験 1
  - ポイント 発光ダイオードの+極の線に手回し発電機の+極につなぐ。反対につなぐと光らない。
- 6 ポイント 電子オルゴールの+極の線に手回し発電機の+極につなぐ。反対につなぐと音が出ない。(p. 62)
- 子 | 手回し発電機とその使い方
- 年 また、回す向きが変わると、電流の向きも変わるものがあるので、向きを決めて回す。(p. 63) 実験2
  - ポイント 電気を貯めるときは発電機の+極にコンデンサーの+たんし、-極に-たんしをつなぐ。(p. 64)

#### 表3 小学校教科書の電流の向きに関する記述内容の比較

なお、○は取り扱いあり(文・図は問わない)、×は取り扱いなしを示す。※は文のみの場合。

学年・内容	第 4 学 年		第5学年	第 6 学 年			
	電流の向き	LEDの	電流の向きと	手回し発電機と電	LEDの	電子オルゴールの	コンデンサー
教科書会社	の定義	端子の向き	電磁石の極	流の向き	端子の向き	端子の向き	の端子の向き
① 東京書籍	○p. 24	×	Ор. 134	○ <b>※</b> p. 151	×	×	Ор. 153
② 大日本図書	× p. 26	○p. 35	○p. 26	○ <b>※</b> p. 63	○p. 62	○p. 62	○p. 64
③ 学校図書	○ <b>※</b> p. 37	○p. 41	○p. 54	○ <b>※</b> pp. 154, 156	○p. 155	×	Ор. 156
④ 教育出版	○p. 39	×	○p. 114	○ <b>※</b> p. 148	○p. 147	×	Ор. 147
⑤ 啓林館	○ <b>※</b> p. 18	○ <b>※</b> p. 18	○ <b>※</b> p. 104	○p. 133	× <b>※</b> p. 145	○ <b>※</b> pp. 133, 144	○ <b>※</b> p. 137

のすべての出版社の文章に共通して「乾電池の+極から モーターを通って、-極へ電気が流れる。この電気の流 れを電流という。」という表現が見られ、電流の始まり と終わりを乾電池の電極にした表現になっている。学校 図書と啓林館は文のみの取り扱いで、電流の向きを書き 込んだ図はなかった。一方、大日本図書ではこのような 記述等はないが、電池とモーターの回路を示す挿絵に よって、電流の流れの向きというよりモーターの回転の 向きを重視しているように見える点が指摘できる。

LED自体については全ての教科書で扱いがあるものの、LEDの端子の向きについては、第4学年では東京書籍と教育出版、第6学年では東京書籍と啓林館が取り扱っていない。つまり、東京書籍は全学年にわたってLEDの端子の向きの扱いはない。また、どの教科書もLEDが一方向にしか電流を流さない理由については触れていない。

第5学年での電流の向きと電磁石の極の関係については、各社とも電流の向きが反対になると極が反対になることは扱っているものの、啓林館が図で示していないという点が指摘できる。

第6学年においてはどの出版社でも、実験に伴って「ハンドルを逆に回すとどうなるか。」といった問いかけが記載されていた。中でも学校図書、啓林館は実験の結果の中で回す方向を変えると、電流の向きが変わるということを整理している。

電子オルゴールは端子を逆につなぐと鳴らない、と明記しているのは大日本図書と啓林館の2社のみあった。

コンデンサーの端子の向きは各社ともコンデンサーには+と-の端子があるという書き方をしているものの, 啓林館が図で示していないという点が指摘できる。

## 2-3 小学校理科での電流の向きの扱いに関する考察

小学校理科における電流の向きは、急に約束事のようにその定義が登場する上、目に見えるものでもないため、児童にとってとらえにくい。LEDをはじめとしてそれぞれの素子はなぜ決まった方向に電流を流すのかといったことについて、その理由は教科書には記述されていない。これを児童には伝えることはないとしても、教員はこの理由を十分に理解していることが求められるはずである。なお、個々の素子で決まっている電流の向きに触れない理由としては、たとえば電子オルゴール素子であれば、これは電気から音へのエネルギー変換の例としてとりあげている点に主眼がおかれるため、またIC化されていて内部が複雑、ということも考えられる。

また、今回着目した特徴的な7つの内容について、啓林館では図で明示していない箇所が多かった。文章のみの表現にとどめることで実験の結果から児童に考えさせるような構成にしているのではないかと考えられる。

## 3. 歴史にみる電流概念

歴史上の科学者たちにとって、実体のつかみきれない「電流」はどのように扱われてきたのだろうか。現代の学習環境で子どもが概念形成する際の苦難は、古典電磁気学の基礎を与えた自然哲学ともいえる物理学開拓者た

ちも経験しているのではないだろうか。その足跡を確認 したい。

#### 3-1 フランクリンの電気流体

物質の静電気的な性質を、目に見えない「電気流体」 が物質に蓄えられたことから説明しようとしたのはフラ ンクリンである。彼より以前には「ガラス電気」「樹脂 電気」という定性的な分類が存在した。フランクリンは 一種類の「電気流体」が二種類の状態(不足または過剰) を持ち、これらの量的な差によって静電気現象が起こる と解釈し、「正の帯電」「負の帯電」という定量的な区別 を用いた。つまり、ガラスを摩擦したときに見られる帯 電は、一定量の電気流体が摩擦棒からガラスへ移動する ことで、前者の不足分だけ後者の過剰がもたらされると する。また、電気的中性とは物体が一定量の電気流体を 過不足なく含んでいる状態で、このとき電気流体間の斥 力は通常物質との間の引力と拮抗しているとする。「正 に帯電」した物質どうしの斥力は過剰な電気流体間の斥 力. また.「正に帯電」した物体と「負に帯電」した物 体のあいだの引力は前者の過剰な電気流体と後者の未飽 和な通常物質のあいだの引力であるとするのである。

フランクリンの「電気流体」はプールハーヴェの「〈火〉物質」をもとにし、それらに引力や斥力がはたらいて現象が説明されるというニュートンの自然哲学の方針に従ったものである。フランクリンは初期には、「電気流体」を〈電気の火〉と呼んだ。〈火〉物質も電気流体も実体ではないが、プールハーヴェの「〈火〉物質」は、熱が量として議論できるということ、特に、移動前後で総量が保存するという考えと、移動の原因(温度)がつりあえば移動が起こらないとする平衡の考えを導入した点が画期的で、フランクリンの電気流体理論はこの保存と平衡という理論的な枠組みが有用であることを示す格好の例となった。

いわゆる「熱素説」は18世紀後半にラボアジェが提唱した定量的熱学の理論であるが、それに対するプールハーヴェとフランクリンによる寄与、とりわけ保存と平衡の概念の影響は極めて大きいといわれている(山本1987)。フランクリンの時代の電気現象に関する知識は極めて限定的であったが、彼は「電気流体」を導入するときに、その実態はなんであれ、それがもつべき性質をうまく言い当てたといえるのではないだろうか。

#### 3-2 ファラデーの電気実験

ファラデーはPhilosophical Transactions誌に発表してきた電磁誘導と電気分解の研究論文14編をひとつの書籍『電気実験』(旧訳は『電気学実験研究』)として出版した。その中で彼は、電流の姿は判然としていないことを確認しながら電流を表現し、研究を進め、発見を行ったことを書き残している。ここでは、「種々の電源からの電気の同一性」「電気化学分解について」「電流の本性」と題された章(論文群)の一部を引用しながら、電流に対する彼のアプローチを探ることにする。

① 「種々の電源からの電気の同一性」(上巻 p. 91) から 「私は電流なる語を用いてある進行的なものを意味させ る。それが電気の一流体であろうと互いに反対に運動す る二種の流体であろうと、または単なる振動であろうと あるいはさらに一般的な進行する力であろうとかまわな い。また配列なる言葉を用いて、私は粒子・流体・力等 の進行的でないものの位置的配置と了解する。配列より もむしろ電流の見解を支持するところの他の理由が多く 促進されているのではあろうが、私は他の人々が必要な ときに当面するべき事柄について不必要に述べることを 避けたいのである。」

電流の実態としていくつかのモデルが提案されているようだが、何かしら時間とともに流動するもの表すことにし、ここでは明確化しないことを表明している。

## ② 「電気化学分解について」(上巻 p. 166) から

「電流についていうならば、およそ電流をそれ自身の効果については一致しながら、科学者たちによる見解が種々に異なっている結果、私は前の場合〔筆者注:引用部①〕におけるよりももっと特殊な事情の下にあることを余儀なくされる。ある科学者たちはフランクリンと同じく一電気流体のみを仮定するから彼らは電流の一般的な一様性と性質については一致しなければならない。」電気分解での正極と負極には、それぞれの極で異なる現象が同時に現れる。一流体説ではこれらが量的に一致するものとする。これに対し、リッフォー、ションプレ、アシェット、ドゥ・ラ・リーヴ、グロトゥスらの見解を

「事実からのみ判断して、われわれは電流と称するものに現れる効力を一金属、溶融体・湿導体または空気・炎、希薄な弾性媒質中においてさえ一合成的・複合的な効力〔筆者注:一流体説以外の説〕と考える少しの理由も存在しない。これを今までは次のように簡単なまたは要素的な効力として解明したことはなかったが、しかしおそらくそのように考えるのが最善であろう。すなわちこれは力の軸において量の正確に等しい逆向きな反対の二力〔筆者注:一流体説の特性〕を有する。/

紹介し、実験結果がフランクリンの一流体説を支持して

いることから、結論として次の言明を行う。

#### ③ 「電流の本性」(下巻 p. 586) から

「流れという語は、通常の言葉においても非常に意味深 長であって、電気現象の考察に応用する場合、われわれ の心に誤解を生じないように、その従来の意味を十分に 剥奪してしまうことは非常に困難である。」

電流という用語に対して、ことばがもたらす誤解に注意が必要であると指摘している。更に続けて、いろいろな状況の下でいろいろな電流のかたちがある中で、それらに共通した保存する流れの量として、いわば抽象化された概念として電流を位置づけていく。

「私はこの言葉を普通の電気的の意味に用いる。すなわち、電気力のある条件及び関係が進行していると想像されるものをいい表すのに使用する。電流は刺激によっても放電によっても生起される。その二つの一般的起因をいかに種々に変化しても、効果は常に同一である。たとえば摩擦・化学作用・熱の影響・条件の変化・感応等によってである。そして放電は伝導・電解・破裂性放電・対流等の形式をもち、しかもこれらの作用に関連した電流は発生してしまえばすべての場合を通じて同一に見える。…(中略)…私は私自身の見解の誤りを避けるために、矛盾を探し求めて努力したが、伝導・電解・対流

及び破裂性放電のいずれの中にも見いだしえなかった。」

#### 3-3 オームの電気抵抗の法則

科学史の上で電圧や電流という概念が定まるのは、オームの法則の受容過程である。そのことを確認したい。オーム(Georg Simon Ohm)は1826年に、いわゆるオームの法則を数式で示した。このときには現代風の「電流」「電圧」「抵抗」という概念は一般にはなかった。電流が流れることで検流計の針が振れる、その磁気作用の程度をXとし、これが導体の長さxによって変化するデータから、関係式

$$X = \frac{a}{b + x}$$

が成り立つことを示したのである。a は回路の起電力, x が注目する導体の抵抗,b はそれ以外の部分の抵抗に相当するが,電流を流すと電池(ボルタが1800年に発表) は起電力の降下が大きかったという。導体の抵抗が小さい(このために他の部分の抵抗が無視できなくなる)こと,またそれによりある程度大きな電流が流れることを考えれば,電源の起電力降下が見られることは避けられないだろう。ゼーベックが1822年に発見した熱起電力を電源とするという実験上の工夫と,その結果を抽象化し、数式で表した(当時はその習慣がなかった)という先進性が評価されたのは,彼のいたドイツではなく,電信技術で先を進むイギリスでであった。このときの事情を文献から引用する。

「オームはフーリエの熱学に学んで、電池と抵抗器からなる回路には一方向への一定量の連続した流れ(高いところから低いところへ)があると考えた。そこでは、電気は〔著者補筆:熱と類似した性質をもつ〕流れとして抽象化された。このような考え方は、静電気や磁気の吸引・反発、電気と磁気の相互作用といった、両極対立の図式で思考してきた旧世代の学者になじまなかった。彼らは、電池さえも、正の電気が正極から、負の電気が負極から出てくるとする二元論で考えていた。数式による解析中心の『数学的に取り扱ったガルバーニ環』を彼らが評価しなかったのはむしろ当然であった。」(高橋雄浩2011 p.61)

ここでいう「連続的な流れ」とは、あくまでもひとつの「物理モデル」であって、実態とは対応しない。このことは熱でも電流でも同じある。

三星はオームによる電圧概念形成の流れを以下のようにまとめている。「まず、電圧概念は静電気の分野における電気的張力概念、すなわち静電気のスパーク放電の距離などに関連する概念に起源をもつ。電池が発明されると、この張力概念がそれにも適用され、ヴォルタなどは電池の張力(両極に分離した電気)を静電気的に検電器の箔の開きで測った。オームはこの検電器で測れるものを検電器力と名づけた。……(中略)……、その2点間の差を電気的張力(現代の電圧につながる)とした。そして、この検電器力が電気回路にも分布する事を仮定してオームの法則(電流法則)を導いた。この仮定はフーリエの熱伝導理論(熱は温度差によって移動する)とのアナロジーからなされたものであり、電気回路の導線の各点においても検電器力(温度に対応)をもっており連

続的に一様に変化して(その差が一定に)分布していると仮定した。この考えはオームが初めてである。そして、検電器力は電池の両極では不連続に変化し、その検電器力の差が電池の張力(現代の起電力=電圧)であるとした。……(中略)……オーム以降、コールラウッシュによって、電池の電気的張力(静電気的に測定)と起電力(ガルバノメーターで測定)との同一性が実験的に示唆され(1848年)、さらにオームが仮定した『検電器力が電気回路各点にも分布していること』が直接検証された(1849年)。」(三星2007、p. 45)

電流の概念に関してオームは仮説を置く。三星によれば「オームは、『オームの法則』の理論的導出において、ガルヴァーニ回路中に静電気的な検電器力(かれにより検電器で測れるものと操作的に定義されたもので現代の電位に対応)の差が一様に連続的に分布しているものと仮定し、この差によって電気粒子が動かされ一定の電流が流れるものとした」(三星2007、p. 27、太字は著者による変更)のである。つまり、電圧は定義できる量であるが、電流はひとつのモデルに過ぎないのである。三星はさらに、オームの仮説を実験的に検証したコールラウッシュの1849年の論文を翻訳し、コールラウッシュの結論部分を引用している。

「この全体系は以下の仮説に基づくものと思われる。つまり、電流は、回路の横断面から横断面への電気の実際の前進に基づくものである。このことは、仮説とうまく折り合っている。しかし、この正当性に関しては、疑うかもしれない。回路の全範囲に渡って、電流と検電器的電気力の分布のより密接な関係はすでに存在する。それは、両者(電流と検電器電気力の分布)は、同じ方法で、換算長に依存しているからである。そして、事実に基づくこの関係は、たとえ、電流の実体を電気の実際の前進の中に認めないとしても、常に成り立つのである。この確かにいくらか物質的な仮説の代わりに何をおいたとしても、それは、どんな原動力であろうか。これによって磁針は振れ、電線を光り輝くまで熱し、著しい化学的親和力にうち勝つのである。」(三星2007、p.36、コールラウッシュ論文からの翻訳引用、太字は著者による変更)

## 3-4 歴史における電流概念についての考察

電流についての概念形成は、はじめに蓄積された静電気による過渡現象からスタートし、ガルバーニ電錐を用いた電気回路(ループ、ガルバーニ環とも表現される)での定常的な電流現象へと進展するとき、電流の大きさをとらえるのはあくまで間接的なものであり、具体的には電流に付随して生じる磁気現象が用いられる。これに対して回路の中での電位の分布は静電気的手法で操作的に定義が確立される。この意味で、電位あるいは電圧を理解するには高度な科学的思考を要するものの、紛れもない形で導入ができるが、電流の概念をとらえるとりまない形で導入ができるが、電流の概念をとらえるとりまない形で導入ができるが、電流の概念をとらえると対象を広げつつ抽象化してその特性を整理し、活用していくという、全く異なる発想で進められてきた科学的経験であるといえるだろう。

## 4. 電動機・発電機におけるエネルギー消費と供給

#### 4-1 科学技術史における電動機と発電機の登場

本論文では第6章において、エネルギー消費型の素子にエネルギー供給の動作をさせるときの仕組みを検討することが、理想化された電流というモデルを学生に活用させるためのトレーニングとして有意義であることを論じていく。具体的に取り上げるのは手回し発電機のモーター(電動機)動作、あるいは模型用直流モーターによる発電、および、LEDによる光発電である。ここで、発電機と電動機の歴史について、文献(高橋雄造 2011、第4章)に従い簡単に紹介する。

ファラデーが電磁誘導を発明した翌年,1832年に発電機の発明がされている。当時は優れた科学実験機器製造家がフランスやイギリスに多数現れ、公開実験用電気機器を開発したという。初期の発電機は水を電気分解して泡が出るのを見せたり人体にショックを与えたりするためのデモ実験機械であり、回転するコイルの周りに永久磁石を配置したが、大電流を得るためには電磁石を配置し電流を流して磁界を生み出す自励発電の方法が開発され(1866年ころ)、実用化されていった。

一方、電動機つまりモーターとしてはファラデーが 1821年に、電流から回転運動を取り出すことに成功する など、デモ実験機械としての開発がまずなされた。電磁 現象から動力を取り出す試みは1830年代に盛んになり、整流子を備えた回転式電動機も開発されている。電池のコストは高いものの、これはワットの蒸気機関(1769年に開発)などの石炭庫とボイラーを必要とする大型で振動もあり、煙や煤にも悩まされながら回転数が上がらなかったエンジンに取って代わるのではないかと期待が高まった。

この期待には当時謎とされた事実が拍車をかけていた。 電動機に流れる電流は静止時に大きく、回転時に小さい という事実である。昔からの永久機関への夢もあって、 理想的な電動機であれば回転力を無限にタダで使えるの ではないかと期待が膨らんだのである。当時はコイルに 発生する逆起電力(次節を参照)が知られておらず、エ ネルギー保存則も確立していなかったからである。これ らが明らかになるのはすぐ後、つまり、1835年に回転式 電動機を発明したヤコビは当時から逆起電力に気づいて いた。エネルギー保存則についてはマイヤーによる熱と 仕事についての論文が1842年、ジュールによる熱の仕事 当量の実験が1843年、ヘルムホルツによる論文が1847年 の発表である。

なお、電動機には大電流電源が必要であり、自励式発電機が開発された後に利用が拡大した。また、電動機と発電機の可逆な関係も知られるようになり、1873年のウィーン博覧会ではそれを示すデモも行われた。

#### 4-2 電動機・発電機における誘導起電力

モーターの回転軸を固定して入力電圧と電流の関係を調べると、回転子のコイルの細く長い巻き線の抵抗にはオームの法則が成り立つ。細く長いとはいえ、抵抗率の小さな銅が使われているため、この抵抗は比較的小さい。したがって数ボルトもかけると数アンペアの大電流が流

れ、ジュール熱が発生する。これが継続して限界を越す と過熱のため断線し、モーターは壊れてしまう。このこ とは、モーターの軸に大きな負荷がかかって回転ができ ない状況で電圧をかけると起こりうる。モーターには許 容電圧が定められているが、それには負荷の上限があっ て、それを超えないことが許容電圧の前提となっている。 モーターの軸が回転しているとき、固定された永久磁 石が作る磁力線をコイルがすばやく横切るという状況が 生じる。コイルが磁力線を横切ると、電磁誘導によりコ イルには誘導起電力(電圧)が発生する。誘導起電力は 「逆起電力」とも呼ばれ、この起電力によってコイルに 誘導電流が流れる場合、この誘導電流が作る磁場はコイ ルの運動を妨げる向きである。これはレンツの規則と呼 ばれ、軸の回転の原因が電気エネルギーの供給によって (外部電源が接続された発電機として) 行われるか、そ れとも力学的な仕事の供給によって(発電機として)行 われるかには依存しない。そして、ファラデーの法則に よれば、この起電力の大きさはコイルを通る磁束の変化 の速さに比例する。

この起電力をモーターの端子上で測定すれば、整流子を備えた直流モーターでは切り替わりながら脈動する。そして、その時間平均値は回転子の回転速度に比例した値になる。ただし、実際にこの起電力がモーターの端子間電圧になるのはモーターの端子が開放されているときである。このとき回転子のコイルには電流が流れないため、「オームの法則によりコイルの巻線抵抗にかかる電圧」はゼロになり、端子間電圧が誘導起電力に一致する。一方、回転子コイルに電流が流れている場合は「巻線抵抗にかかる電圧」がゼロではない。これに誘導起電力が加わったものが端子間電圧になる。ここで問題になるのは、この「巻線抵抗にかかる電圧」はコイルの誘導起電力と同じ向きか逆向きか、という問題である。

この「巻線抵抗にかかる電圧」はコイルに流れる電流 に比例した大きさと向きをもつ。したがって、ここで考 えようとしている問題は、『同一の構造を持った電動機 と発電機とを、回転子が同じ向きになるよう回転させて 比較するとき、電動機動作での電流流入端子は、発電機 動作のときに電流流入端子となるか、それとも電流流出 端子となるか?』ということもできる。あるいはさらに、 2台のモーターをならべて軸を直列に結合させ、一方を 電動機動作させもう一方を発電機動作させるとき、電動 機の正極端子は、発電機の正極端子は同じ側となるか、 と読み替えてもよい。

ここでまず確認すべきことは、電動機の電流流入端子は正極(外部回路から正電圧がかかる)、他方の端子は負極(負電圧がかかり、電流が外部回路へ出る)ということである。そして、この電動機の端子間電圧は誘導起電力と「巻線抵抗にかかる電圧」の和であり、これらの電圧はいずれも電流の向きに対して、電位が降下する向きである。つまり、逆起電力の向きは永久磁石の磁束の中を動くコイルを備えた回転子の回転を妨げる向き(レンツの規則)で、コイルに流れる電流とは逆向きになる。この向きは外部回路によって「巻線抵抗にかかる電圧」に見られる電圧降下と同じである。一方、発電機では単に、発生した起電力の電位の高い端子から電流が外部へ

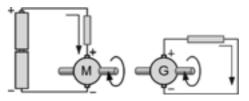


図1 手回し発電機(記号G)と、それを同じ回転の向 きに電動機動作(記号M)させるための回路。

流れ出す。こうして、同一の構造を持った電動機と発電機が同じ向きに回転するとき、電動機の正極(外部から電流が流れ込む)端子は、発電機動作でも正極(外部へ電流が流れ出す)端子になる(図1)。

この結論は一般に、電気エネルギーの消費と生成という、互いに逆のプロセスが同じ内部構造のもとで起こるときに共通した性質である。すなわち、電位はポテンシャルエネルギーとしての性質から、内部構造の位置関係によって決まり、同じ内部構造では同じ電位分布をもつ。一方、素子が回路から電気エネルギーを吸収するか放出するかという差異は、端子の電位配置が同じものであれば電流の出入りする向きによって決まる。エネルギーを吸収するような電気エネルギー消費型の素子では、高い電位の端子(正極)で外部回路から電流が流れ込む。エネルギーを放出するような電気エネルギー生成型の素子では、高い電位の端子(正極)で外部回路へ電流が流れ出る。

## 5. ダイオードの極性に関する問題

#### 5-1 実際のデバイスでの非対称内部構造

歴史が近代や現代に突入し、電子や原子によるミクロな視点を獲得した後も、電流という概念は担体の分布を平均化し、それが均一に分布した理想流体で置き換えたモデルに立った「平均(=総量÷空間)としての電流密度」で定義される。あるいは、空間における分布の総量としての電流に意味をもたせることで、理論的には太さのない(電流密度が無限大の)電流も扱われる。

そのような概念やそれに基づく理論には適用限界があるのはいうまでもない。そして、このような理想電流という考え方には、現実的な特性を剥ぎ取ったために、使用上の重大な制約への理解が難しいという欠点がある。

電解コンデンサーや電気二重層コンデンサーに正極・ 負極の極性表記があって、逆向きの利用を禁じているの は、その内部構造が正負で対称的ではないからだといえ る。最も単純な二重平板コンデンサーは正負で対称的な 構造であるが、そのあいだに物質(電解質)が入ればそ の内部でのイオンや電子移動の容易さが正負で異なるた め、それを補う機構が内部の形状として実装されるなど、 説明図を見るだけでわかるような非対称構造になる。

端的にいえば、電解質を内蔵する素子では、正極端子は内部に正極物質が接続され、負極端子は内部に負極物質が接続されている。これは乾電池や二次電池では明らかである(マンガン電池なら正極:二酸化マンガン、負極:亜鉛(金属)、リチウム電池は正極:二酸化マンガン、負極:リチウム(金属)、ニッケルカドミウム電池

では正極:水酸化ニッケル, 負極:水酸化カドミウム, ニッケル水素電池では正極:水酸化ニッケル, 負極:水 素吸蔵合金)。

LEDや電子オルゴールではダイオードのP-N接合が端 子の極性を決める。ダイオードの端子はアノードとカ ソードと呼ばれる (次節を参照)。ダイオードに電流を 流し続けるには、電子の多いN型半導体へ電子を供給し、 正孔の多いP型半導体から電子を奪う(正孔を供給する) ことと、電子と正孔が接合面等で対衝突して消滅する (エネルギーは熱などになる)というプロセスが持続す る必要がある。このように、外部からN型半導体側に負 電圧、P型半導体側に正電圧をかける場合、この電圧は 順方向であると呼ばれる。順方向では、N型半導体の中 の電子はP型半導体にかけられた正電圧部に引き寄せら れ、P型半導体の中の正孔はN型半導体にかけられた負 電圧部に引き寄せられる。しかし、逆方向の電圧印加で は、N型半導体から電子を奪い、P型半導体へ電子を供 給する(正孔を奪う)ために、接合面付近では電子と正 孔が欠乏し、電荷の移動が止まって電流は流れない。

なお、LEDは透明なプラスチック製であればルーペで注意深く内部を見ると、微小な発光体付近の形状が非対称であることがわかる。しかし、光を透過させる上側の物質がN型かP型かという点は一意的には決まっていないようで、物質の違いに依存するようである。

#### 5-2 電極とアノード・カソード

アノード(anode,略号A,ダイオードの回路図記号では三角形の底辺)は外部から順方向電流が流れ込む端子として、またカソード(cathode,略号K,ダイオードの回路図記号では長い棒)は外部へと順方向電流が流れ出す端子として、それぞれ定義されている(図2)。外部回路から電気エネルギーの供給を受け、それを内部で熱などに変換する回路素子(これを、電気エネルギー消費型と呼ぶことにする)であれば、ダイオード、LED、あるいは電気分解で定義はみな同じで、アノードには外部回路から正電圧がかかり、電流が流れ込む一方、カソードには負電圧がかかり、電流が流れ込む一方、カソードには負電圧がかかり、電流は外部回路へと流れ出す。一般にアノードは陽極、カソードは陰極と呼ばれる。電気公留の場合に電解所内部のイナンについてアコナ

電気分解の場合に電解質内部のイオンについてアニオン(負イオン)とカチオン(正イオン)が定義されているため、電解質中で「アノードにアニオンが集まり、カソードにカチオンが集まる」ことになる。このことを、日本語では「陽極に負イオンが集まり、陰極に正イオン

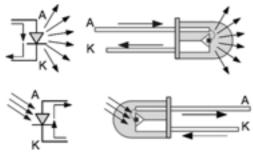


図2 LEDのアノード(A)・カソード(K) 端子、およびダイオードによる光発電。

が集まる」という。用語の定義(あるいは翻訳)が異なる発想のもとで行われたようである。

ダイオードのP型半導体とN型半導体それぞれから外部回路へとつながる端子は、順方向に電圧が印加され電流が流れている場合の定義に従い、P型側がアノード、N型側がカソードである。

一方、外部回路に向かってエネルギーを供給し、内部では化学エネルギーなどを電気エネルギーに変換する素子 (これを、電気エネルギー生成型と呼ぶことにする)、具体的には電池であるが、その回路図記号はよく知られているように、外部に電流が流れ出る端子が長い棒で表される。すなわち、カソードが電池の正極(乾電池の+極)に対応する。電位の高低はプラスやマイナスに対応し、正極・負極と名付けるのは当然であるが、外部へエネルギーの供給を行う素子では、電位の高い正極から回路へ電流が流れ出すために、一般の電池では正極がカソード、逆に負極がアノードと呼ばれる。形式的には陰極が正極となるのである。

ただし、光電池(太陽電池)やフォトダイオードはP-N接合の接合面を広くしたダイオードである。ちょうど、LEDが電子と正孔の対衝突で光子を放出するのと逆で、光電池やフォトダイオードでは光子を吸収して電子が励起され、その抜け穴として正孔も生成される。これは端的に、光発電と呼んでもよい。このときのエネルギー変換効率は小さいが、透明ガラスで覆われた普通のダイオードやLEDでも、このような光発電ができる。

これらのダイオードによる光発電では、P型側から外部へ電流が流れ出し、N型側に流れ込むので、P型側が正極、N型側が負極となる。アノード・カソードという名称はダイオードとしての内部構造が優先され、光発電素子では正極(P型側)がアノード、負極(N型側)がカソードと呼ばれる。

以上をまとめると、回路の中にLEDなどの電気エネルギー消費型のダイオードがあるとき、電流が流れるのは外部の電源によりアノードには正電圧がかかり、カソードには負電圧がかかるときである(順方向)。電流はアノードで回路からダイオードへ入り、カソードでダイオードから回路へ出るという向きに流れる。一方、光電池などの電気エネルギー生成型のダイオードが回路の中にあるとき、アノードの電位が上がり、カソードの電位が下がるため、電流はアノードでダイオードから回路へ出て、カソードで回路からダイオードへ入るという向きに流れる(逆方向)。つまり、電気エネルギー消費型と生成型とには、電位の配置が同じで電流が逆転する、という定性的関係が成り立つ。

## 5-3 電流の向きに関する誤解

光発電の素子における上記の関係を整理できずに混乱し、光電流を逆に流れるものとして想起してしまう大学生は少なくない。それにはいくつかの理由が考えられる。そのひとつは、回路図記号から電流の向きを一意的に決めてかかるということだ。これは、記号に託された意味を自己流に拡大解釈してしまうことで、ダイオードの記号にある三角形が示す向きに電流が流れると決めつけるものであろう。特に、電流という理想的過ぎるモデル

を反省することなく信じて疑わないような学生は、この ような決めつけが起こりやすいようである。

さらには, ダイオードと電気回路のあいだでの電気エ ネルギーの移動まで考察を進めた結果、間違えた結論を 導いてしまうことも考えられる。電気エネルギー消費型 の素子(通常のダイオードやLEDなど)では回路から その素子に電気エネルギーが流入する。それに対し、電 気エネルギー生成型の素子 (光発電を行う) ではエネル ギーの移動方向が反転している。この、エネルギーの流 れの向きの反転の原因を「電位差は変わらず、電流の向 きが反転する」ととらえるならば正しい。内部構造とし てのP型とN型の半導体の位置関係を固定して考えると きは、この構造によってアノード (P型側)・カソード (N型側)の電位差の向きは固定されるのだ。ところが 逆に,「電流の向きが変わらず、電位差が反転する」と 仮説を立て、さらに「電流の向きは記号が示すように決 まる」と間違えて考えればそれはそれで納得してしまう 可能性がある。

ダイオード素子における発光と光発電という. 逆のプ ロセスにおけるエネルギーの移動方向の反転は自明であ り、電位が荷電粒子に対するポテンシャルエネルギーと して、空間の各位置に対して定義されるということと、 その電位の定義がその素子の内部構造によって与えられ ることが意識できれば、電流の向きを誤解することはな い。電流を負の電荷を持つ電子の流れとみなすなら、低 電位のLEDのカソード (N型側) へ、高いポテンシャ ルエネルギーの電子が外部回路から流入し、LEDから 出るときには低いポテンシャルエネルギーになって、高 電位のLEDのアノード(P型側)から回路へと流出す る。LED内部でのポテンシャルエネルギーの減少がこ の場合の電気エネルギーの消費にあたる。光電池で電気 エネルギーを生成する場合であれば、光電池のカソード (N型側) が低電位であって、電子のポテンシャルエネ ルギーは高く、これが外部回路へと流出する。回路から 光電池のアノード(P型側)に達した電子はポテンシャ ルエネルギーが低く、この端子は高電位になっている。

一方で、電気エネルギーが荷電粒子の運動エネルギーとして運ばれる、という誤解があり、これは初等理科教育で問題になる代表的な誤概念のひとつである。電気エネルギー消費型の素子に入るときは運動エネルギーが底く、出るときには低いとか、電気エネルギー生成型の素子に入るときは運動エネルギーが低く、出るときには高いという誤解で、本質的にはポテンシャルエネルギーを運動エネルギーにすりかえたために生じるものである。電流は荷電粒子の流れではあるが運動ではない。実際の荷電粒子の運動は激しく、電流として理想化したモデルではこれを捨象していること、また、回路に電流が流れているときにはその出口と入り口で、同じだけの運動エネルギーの出入りがあることを忘れてはいけない。

## 5-4 エネルギーの流れに関する理論

なお、回路へエネルギーを供給する素子(電池、光電池など)から、エネルギーを消費する素子(抵抗、LEDなど)へのエネルギーの流れについて、学者レベルでも考え方に賛否(あるいは誤解)があり、一般にはあまり

知られていない問題もある(松田 2014, 細野 1999)。

回路を構成する導線に抵抗がある部分では、その部分の電位差と電流の積がその部分で発生するジュール熱であり、これが回路の内部から熱として外部へと排出されているエネルギー量を与える。では、導線に抵抗がない部分はどうやってエネルギーを供給素子から消費素子へと伝達させるのか、という問題である。

ここで、エネルギー供給素子は内部に、消費素子は外部に切り分けるような閉曲面を設定すると、消費素子でのエネルギー消費はこの閉曲面内部での総エネルギーの減少に等しい。そして、マクスウェルの電磁気学の理論によると、内部での総エネルギーの減少はジュール熱による損失か、あるいは、ポインティング(Poynting)という物理学者が導入したエネルギーの流れの密度を表すベクトル量で表現される。このエネルギー流の密度は理想導体の内部ではゼロである。したがって、エネルギーを供給素子から消費素子へと伝達させるのは<u>導線の内部ではなく、外側の空間に広がる電場や磁場を介してである。</u>(高橋英俊 1959、パノフスキー・フィリップス1962、バーガー・オルソン 1992、今井 2003)

## 6. 電流の向きの意義を再認識させる教育試行

#### 6-1 小学校教員養成での教育試行

2012年度千葉県・千葉市の教員採用試験 小学校教諭 問題【24】に、発光ダイオードとコンデンサー、そして 手回し発電機を組み合わせた問題が出された。問いは(1), (2), (3)の三問あり、それぞれ4個、6個、3個の選択肢 が与えられた選択問題である。(1)は2台の手回し発電機 の出力端子を同極どうし接続し、一方を手回しして他方 がどちらに回るかという同型の発電機・電動機を電気的 に接続した問題、(2)は1台の手回し発電機に2個の豆電 球を直列, および並列に接続して, 一定の速さで手回し したときのハンドルの手ごたえと電球の明るさを比較す る問題、そして(3)は1台の手回し発電機にコンデンサー を接続し、手回し(向きは図示)して充電し、手を離し て放電させるときのハンドルの動きを問う問題であった。 実際に作業を行っていれば印象強く記憶に残る現象では あるが、電動機・発電機での電流の向きが理解できなけ ればこれらに自信をもって答えることは難しい。

そこで、小学校教員養成課程で理科に強みをもつ学生(理科選修)の2年次専門教育の授業の中でこの問題で扱われた内容等を手回し発電機を使って体験活動させ、 $4,700~\mu F$ の電解コンデンサーと1.0~Fの電気二重層コンデンサー、廉価な(熱破損してもよい)LED、定格2.5~V-0.5~Aの豆電球および同程度( $4.7~\Omega$ )の抵抗を用意した。4つの場合

- (A) 手回し発電機の出力を開放
- (B) 手回し発電機の出力を短絡
- (C) 手回し発電機の出力に豆電球と抵抗を直列に接続
- (D) 手回し発電機の出力に豆電球と抵抗を並列に接続について、(A)と(B)および(C)と(D)で、それぞれどちらの手ごたえが重いか、実験の前に予想を答えさせた。このとき受講した21名の学生うち、(A)と(B)では(A)の手ごたえが大きいと予想したのは4名、(B)は18名であった。(C)と(D)



図3 問題に示した回路図と、解説用の図。

では(C)の手ごたえが大きいと予想したのは17名, (D)は2名であった。多くの学生が、短絡すると手ごたえが大きくなることは知識として知っているが、それを有限の負荷抵抗の場合に当てはめることはできないようだった。

この日の活動を元に、期末試験の際の追加課題として、手回し発電機で1Fコンデンサーに充電を行う実験(図3)について質問した。このとき、手回し発電機の出力にはコンデンサーのほか、LED(直列に5Ω程度の保護抵抗を入れる)を並列で挿入し、手回しをしてコンデンサーを充電する時にはLEDが点灯する向きとした。試験終了後に演示実験を行い、必要があれば考え直してもらった。このときの問いは三間で、コンデンサーの充電ができたところで、①発電機のハンドルを急に固定する、②発電機のハンドルから手を離し自由にする、③発電機の配線を即座に取り外す、という動作に対しその後のハンドルの動きやLEDの点灯の様子を問うものである。

回答者21名中、①に正答「LEDが消える」を答えた者は6名、その他は「ついてから消える」1名、「つく」15名で、多くの学生は発電機内部の抵抗が小さいという理解が十分できていなかった。

②ではLEDについて、正答「つくが直ぐ暗くなっていく」3名、「つく」16名で、「つかない」という誤答は3名であった。また、ハンドルの動きについて、正答「同じ向きに回り続ける」が7名、その他は「逆回転する」10名、回転するが向きの明示のないもの4名、無回答1名であった。

③は正答「つく」17名、「つかない」は5名であった。 この問題の正答者はコンデンサーでは放電時に電流が反 転することを正しくとらえている。誤答者の中には②で 示した誤解にのっとって誤答を導いた者も数名いた。

②の誤解の多くは並列回路であることがこのクラスの学生にとって複雑であるということを表しているようである。解答者の中にはコンデンサーの充電時と放電時でコンデンサーの端子を通って流れる電流の向きは変わらない(誤)とし、そのためにハンドルが同じ向き(正)に回転する、またLEDには逆方向の電流が供給されてつかなくなる(誤)、という誤解に基づく説明をするものが複数いた。これらの現象に対して部分的に適合する認った説明を形成してしまう典型的な例であろう。電流と電圧の意味を考えさせながら、もう少し段階を細かく設定して理解を確認していく必要があると感じられた。

## 6-2 LEDの発光・発電時の I-V 特性に関する物理実験

中学校理科および高等学校(物理)の教員養成のための物理実験授業の中で、新たにLEDの電流-電圧特性(I-V特性)を調べる課題を設定した。実験で用意したLEDは青(中心波長470 nm)、緑(555 nm)、黄緑(565 nm)、

橙(605 nm), 赤(640 nm) および赤外(940 nm) の6種類の $5 \text{ mm} \phi$ 砲弾型LEDで, 定格は逆電圧5 V程度, 順電流30 mA程度である。学生にはこれらの中で2種類を選んでI-V特性を調べて比較させた。特に, 小さな順方向電流が流れている領域で電流軸を対数にとってI-V特性をプロットさせ.

$$\log_e I = \frac{e}{nk_{\rm B}T} V +$$

$$E$$

の式に従うことを確認させた。 $k_B$ はボルツマン定数,T は絶対温度,eは電子の素電荷であり,nは $1\sim2$ 程度の定数で,代表的なn=1となる過程(キャリア拡散)とn=2となる過程(キャリア再結合など)があり得ることを補足した。多くのダイオードでn=2が適合したが,青色用に用意したものだけは別の過程が重なり,片対数グラフは直線にならなかった。学生への課題として、ボルツマン定数等を与えて温度を評価させた。多くの学生はn=2の下で $T\sim300$  Kにフィットするデータ処理を行うことができた。

なお、三門は I-V 特性の立ち上がり電圧と中心振動数の関係からプランク定数を評価する実験を提案している(三門 2008)が、今回選定したLEDは微小な電圧でもわずかに発光するようすが目視確認されてしまい、立ち上がり電圧はきわめて小さいかほとんど定義できないような結果となった。近年の高輝度LEDは単純な構造になっていないことも考えられ、三門の方法を追従することはできなかった。

また, ふたつのLEDを向かい合わせて, 一方を一定 電圧で発光させ、他方でその光を受けて光起電力を測定 させた。このとき、受光側のLEDには負荷抵抗として 33, 10, 2.7, 1.0, 0.56 ΜΩの抵抗を接続し(あるいは 開放で、または2MΩ可変抵抗を用いて)、内部抵抗(ほ ぼ10 MΩ) を測定したデジタルマルチメーターで光起 電力(V)を測定し、負荷抵抗で割ることで光電流(I) を求めて、受光時の I-V 特性を評価させた。この結果 では、赤外のLEDを同種どうし向かい合わせたペアで 測定した場合が最も大きな光電流が得られたが、それで も  $V=0\sim0.7$  Vの範囲で約80 μAでしかなかった。ま た,このLEDのギャップエネルギーは1.32 Vが想定さ れるが、光起電力は最大(光電流がゼロ)で0.94 V程 度となった。この実験での学生への課題として、負荷抵 抗が大きい時には出力電圧が大きく、負荷抵抗が小さい と出力電圧が小さくなるが、出力電圧が十分小さい (ギャップ電圧に比べて) ときに光電流はほぼ一定であ ることを確認することに関する実験課題を出した。学生 はほぼ全員実験結果でこのことを示した。その理由はI-V 特性の急激な立ち上がりと対応するのだが、これを議 論するまでには至らなかった。

なお、この実験は2014年度前期の授業で初めて取り上げた。学生は、実験の実施自体はうまくこなしたが、自由記述となるレポートでは、光発電の電流の向きについて明確に説明しているレポートは極めて少なかった。今回の実験において定性的な議論が十分できなかった原因はこれまでの物理実験の実施あるいは報告書作成では低次認知レベルの思考スキル(記憶・理解・適用)ばかりが重視され、高次認知レベルの思考スキル(分析・評

価・創造)がおろそかになっていることにあると考えている。教員養成のための理科や物理では実験を通して現実の現象に対する経験を深めることを重視しているので、実験授業の枠組みを改訂しながら、発光と発電での電流・電圧の役割について考えさせることを検討している。

### 7. まとめ

電流は基本的でありながら高度に抽象化されたモデル であり、それを理解していくことは容易ではない。特に 小学校の子どもがさまざまな世界観を広げていく中で、 電流を使いこなすことは重要なことであるが、電流の概 念形成を言語活動に頼って「説明できる」ことにこだわ るとすれば、筆者は、それが電流の表現を固定化し、ア プリオリ的な導入に近い状況を生み出してしまうのでは ないかと危惧する。電流というものを仮に名づけ、暫定 的に表現するものの、いろいろな科学的体験を通して次 第に明確化していくという学習プロセスを適切に構築す る必要があるのではないだろうか。その中で、電気エネ ルギーの消費と供給というわかりやすいプロセスと、内 部構造により電位分布が定まるために逆プロセスでは電 流が反転するという認識は、電流とエネルギーの関係を 考察する上で重要であり、教員養成で重視すべき大きな 課題であると考えられる。

なお、現在文部科学省等で学校制度(6-3-3年制)の変更が検討されているが、現在6年間の小学校が分割され、小学校理科の学習が途切れるなら、電流に関わる段階的な科学的体験を注意深く再構築していく必要があると思われる。

最後に電気の研究についてのファラデーのことばを引 用して結語とする。

「電気学はそのいずれの部分も実験的研究を必要とする。 それは単に新しい効果の発見のためばかりではない。む しろ現在では、それよりはるかに重要であるところのこ と、すなわち古い種々の効果を得た仕方をさらに発展さ せて、自然界における最も特殊なまた普遍的な能力の作 用の第一原理に関するさらに正確な結果を得ることであ る。一したがって、疑問を熱心かつ細心に追究し、実験 と類推とを組み合わせ、自己の先入観念に対しては用心 深く、理論よりも事実を尊重し、性急に一般化を急ぐこ となく、何よりも自ら進んで、一歩一歩自分自身の意見 を理論と実験との双方から厳重に対決させるところの科 学者たちにとって、電気学ほど発見に対して見事な得や すい分野を提供している学的部門は他に存在しないので ある。」(『電気実験』下巻p. 411、太字は筆者による変更) 本論文では第2章およびその表の作成を西村が、他の 部分の執筆および全体の調整を加藤が担当した。

実験の実施においては林美恵子さん(千葉大学普遍教育物理実験)と東﨑健一氏(千葉大学名誉教授),また各社教科書を参照するに当たっては林英子准教授(千葉大学教育学部)にお世話になりました。感謝いたします。

## 参考文献

文部科学省(2008),『小学校学習指導要領』 文部科学省(2008),『小学校学習指導要領解説 理科編』 文部科学省(2014),『小学校用教科書目録(平成27年度 使用)』

毛利衛ほか(2012),『新しい理科』東京書籍 有馬朗人ほか(2011),『たのしい理科』大日本図書 日高敏隆ほか(2013),『みんなと学ぶ 小学校理科』学 校図書

養老孟司ほか (2012), 『地球となかよし 小学理科』教 育出版

大隅良典ほか (2012), 『わくわく理科』啓林館 山本義隆 (1987), 『熱学思想の史的展開』(第7章) 現 代数学社

M. ファラデー (1980), 『古典化学シリーズ10 電気実験』矢島・稲沼訳) 内田老鶴圃

高橋雄造(2011),『電気の歴史』東京電機大学出版局 三星孝輝(2007),『オームの論文でたどる電圧概念の形 成過程―理科教師や理工系学生のために―』大学教育 出版

高橋英俊 (1959), 『物理学選書 3 電磁気学』 § 122, p. 319, 裳華房

パノフスキー・フィリップス (1962), 『電磁気学』(上) (林・西田訳) p. 197, 吉岡書店

バーガー・オルソン (1992), 『電磁気学Ⅱ 新しい視点 に立って』(小林・土佐訳) p. 22, 培風館.

今井功(2003),『新感覚物理入門』岩波書店

松田卓也(2014),『間違いだらけの物理学』学研教育出版 細野俊夫(1999),『メタ電磁気学』第9章, p. 139, 森 北出版

- 三門正吾 (2008), 『LEDを量子分野教材とすることに ついての考察と実験』物理教育 第56巻第2号, p. 117.
- B. Van Zeghbroeck (2011), "Principles of Semiconductor Devices", Chapter 4 "p-n Junctions", http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/toc4.htm