

## 報告

# 自然現象の可視化

— 親子理科実験教室から学ぶ —

山下 芳 樹 ・ 坂 東 昌 子  
石 尾 広 武 ・ 上 田 倫 也  
川 村 康 文 ・ 前 直 弘

### 要 旨

小学生を対象とした親子理科実験教室（5回シリーズ）を、京都大学理学部、またNPO法人あいんしゅたいん、さらにはNPO法人サイエンスEネットの協力のもと実施した。実施内容である「電気・磁気」は小学校理科の単元ではあるが、「私の小学校時代の夢」と題した第一線の研究者の講話を設定するなど、科学する心を大切にしながらも、ものづくりを通じた科学実験を体験できる構成とした。小学生対象ではあったが、この実験教室を通して、大学教育、特に導入教育や一般教育にも通じる様々な知見が得られた。現象の可視化をはじめ、得られた方略は初等中等教育から大学教育へとスムーズな科学教育を模索し、展開しうる可能性を拓いた。

### キーワード

可視化, 理科教室, 電磁気学, 教育, 科学としての科学教育

## 1 はじめに

研究に携わる大学教員の多くは、純粋な研究のみならず、同時に教育も受け持っている。物理学研究者の場合は、これまで、初等中等教育はもちろん、高等教育に対しても、教育自体を科学の対象とする位置づけが希薄だった。これに対して、例えば米国では、40年以上も前に、ノーベル物理学賞受賞者である R.P. フェインマン (R.P.Feynman:1918-1988) も協力して物理教育にとり組み、地域の小中高等学校の教員とともに研究会を組織し、科学教育を学問分野の1つとして深める活動を開始していた。現場の教員の取り組みから集約されるノウハウを科学にする活動を通して、大学教員と地域の小中高等学校教員との連携がここにできたのである。

英国では、日常身の回りで見られる現象やハイテクな道具などを通じて、科学教育を実践するアドバンシング物理の教科書作りが物理学会を中心に成果を挙げている。

もちろん、わが国にもこうした物理教育の研究がなかったわけではない。むしろ、日本には熱心な現場の教員と大学教員の地道な活動によって優れた理科教育のノウハウと教材が蓄積されて

来てはいる。しかし、これは熱意ある個人の努力に委ねられ、しかも制度上の保証のない状態で持続的に行われてきており、科学教育研究者を育てる専門講座も数えるほどしかないこともまた事実である。一方、2009年度から、正式に教員免許状更新講習が全国の大学で始まり、大学と小中高等学校の教員との接触の場がより日常的に求められる時代に入った。今後は、両者の連携を深め、科学教育を科学の対象として捉える取り組みを、より一層、強めて行かなければならない。国際的にも遅れをとっている日本の科学教育にとって重要な段階にきていると言えよう。

このような状況下で、NPO 法人知的人材ネットワークあいんしゅたいんは、2010年5月から、NPO 法人サイエンス E ネットの協力のもと、「親子理科実験教室」を京都大学理学部と共催で企画運営してきた。この取り組みの中で、大学教育につながる様々な知見を得ることができた。そのいくつかを提供することによって、小中高等学校教育からのつながりの中で大学における一般教育、特に科学教育を考える契機としたい。なお、本論考では、「可視化」という視点から教材構成、またその提示の在り方を論じることとする。

まず、第2節で「親子理科実験教室」を開催した経緯を概観し、第3節では、初等中等教育の系統性と大学一般教育とのつながりから、今回この親子理科実験教室で実施したテーマについて説明する。第4節で可視化についてレビューし、認知的葛藤を育む教材についての意義を考察する。第5節で大学教育への提言を行いたい。

## 2 親子理科実験教室開催の経緯

NPO 法人知的人材ネットワークあいんしゅたいんは、日本物理学会のキャリア支援事業を継続するための組織として、2009年2月5日に京都を中心として設立された。ポスドクを含む知的人材を社会で活用することを動機としているが、その主要な活動の目標は、大学などの研究者と地域の住民、更に学校の教員との間のネットワーク作りを行い、それを拡充することである。この活動は、科学教育を科学として追求するための研究会やシンポジウムを企画することから始まる。

上記のような情勢を踏まえて、NPO 法人あいんしゅたいんは、科学教育の普及に向け、目的を共有する様々な組織と連携して、研究会やシンポジウムなどを企画運営してきた。以下、その主なものを列挙する。

- シンポジウム「理科教育にルネッサンスを－未来に発信するキャリア展開にむけて－」日本物理学会キャリア支援センターイベント（2008年3月3日（月）京都大学基礎物理学研究所）
- 研究会「教育キャリアパス研究会：科学教育にルネッサンスを－教育分野キャリアパス実現に向けて－」：日本物理学会キャリア支援センター・京都支部合同イベント（2008年8月8日（金）～8月9日（土）京都大学湯川記念館 パナソニックホール）
- 基礎物理学研究所研究会「科学としての科学教育」（2009年8月26日（水）～8月28日（金）：京都大学湯川記念館 パナソニックホール）
- シンポジウム 科学交流セミナー特別企画「科学普及・科学教育はどうあるべきか－理科好きの入口から次のステップへ－」（2010年2月11日（木）京都大学湯川記念館 パナソニックホール）

なお、シンポジウム「科学交流セミナー特別企画『科学普及・科学教育はどうあるべきか』」において、NPO 法人サイエンス E ネット主導のもと、特別企画として「子どものための科学冒険の旅」を試行的に実施した。これは、保護者をも含む小学生を対象とした親子理科実験教室であり、電磁誘導で発光ダイオード（LED）を灯す「しゃかしやかライト」を教材とした体験実験や、自転車発電によって電気を起こしテレビをつけるというショー的要素も加味された。理科離れ、理科嫌いが叫ばれる中、「是非このようなイベントを続けて欲しい」という実験教室開設を望む多数の声が寄せられ、「2010年春の親子理科実験教室（月末の日曜日午後開催、全5回シリーズ）」の構想がスタートした。当初、小学3～6年生を対象に、定員40名として募集を始めたが、その反響は予想を超え、ホームページを公開する前から問合せが相次ぎ、受講対象を小学1年生から中学生にまで広げた。受講対象から外れた希望者のために、夏期休暇を利用して特別講座（3回連続講座）を実施する盛況ぶりであった。



図1 親子理科実験室の実施の様子

親子理科実験教室のプログラムは、各回とも二部構成であった。一つは理科実験、もう一つは「私の子どもの頃の夢」というスタイルのもと、各回、京都大学の教授や名誉教授に約15分語っていただくというものである。研究現場の見学も含めた最先端科学のトップクラスの話は本実験教室の特色をなすものであり、その評判は良かった。

2010年9月末現在、春の親子理科実験教室に加えて、3回シリーズの夏休み集中コースを終えて思うのは次の2点である。すなわち、まずは高価な受講料を払ってでも、実験教室に参加し、科学の不思議に触れてその理解を深めたい（させてやりたい）という児童（保護者）の存在であり、次には、その純粋な知的好奇心を目の当たりにし、「理科嫌い・理科離れ」などというのは、理科離れを既に起こしてしまった大人からの一方的な「叫び」なのではないかという疑義にも似た懸念である。多くの感激を交え終了した時点で、このまとめの中から浮かび上がった「可視化」という視点は、今後、大学が、純粋基礎研究での一流を目指す指向と、その科学技術の基盤を社会にどう還元していくかという複合的な目的を遂行するにあたって、特に大学一般教育の在り方に関わっては、いくつかの示唆を与えるものであった。

ここでは、本シリーズで実施したテーマ「電気磁気」において、「可視化」、すなわち見えるこ

との意義を通して、初等中等教育との系統性に配慮した大学教育のあるべき姿について提言を行いたい。

### 3 親子理科実験教室開催のテーマについて

#### (3. 1) 初等中等教育の系統性と大学一般教育

##### —小中高等学校の系統性は大学一般教育にどのような影響を与えるか—

実験テーマについては、自然科学の学習の中で、他の分野に比して、目に見えず分かりにくいとされる電気・磁気分野に焦点を当てた。IT 時代、ハイテク時代と呼ばれる現代、電磁気は社会の隅々まで浸透して多様な形で利用されている。携帯電話は電磁波が空間を伝わって伝搬することを、また LED 電球は半導体技術の粋としてエネルギー消費を抑える新しい発光のメカニズムを、というように今や電磁気存在をじかに体験できる。小学校理科で扱う電気の導入部が、まず、「光発電（光電池）」から始まり、続けて「電池」もまた同様に灯りをつけることができるという構成を見るにつけ、かつての電磁気に比較して、いかに日常のハイテクの影響が浸透しているかを実感する。こうした電気や磁気の働きを様々な道具を駆使して自ら試していくこと、そして電気や磁気の発見のわくわくした楽しさを味わってほしいこと、これらが本実験教室開講時の願いであった。

この自ら試して（もの（事象）への触れあい）、発見の喜び（もの（人）との関わり）を体験してもらうため様々な工夫をした。また、参加児童だけではなく、保護者にとっても、世の中で使われている機器に対する新しい発見ができるように心がけた。例えば、最近の照明機器は白熱電球から LED に移行しているが、LED がなぜ従来の電球に比べて効率が良いのか、磁石のしくみはどうなっているのか、プリペイドカード（磁気カード）にどうやって情報が記録されているのかなどの身近な話題を含めた。大人も「面白いな、来て良かったな」という教室にしたいという思いがあった。

なお、表 1<sup>1)</sup> は、本実験教室のテーマとした電気・磁気分野が、小学校理科、中学校理科（第一分野）、および高等学校物理という 3 つの校種においてどのような関係にあるかを示したものである。小学校理科と中・高等学校との違いは、小学校では学習内容が学年ごとに分散されており、子どもの発達段階に応じたものを学ばせるという児童の「活動優先型」に対し、中・高等学校では分野としてまとまりのあるものを特定の学年で一括して与えるという「分野優先型」だという点がまず挙げられる。

他方、学習内容に関しても特徴的な傾向が見える。例えば電場・磁場に代表される「場の概念（近接作用）」については中学校理科からはじまるが、しかし、磁場については磁力線という比較的イメージしやすい概念を用いて小・中学校で扱うのに対し、電場に関しては視覚に訴え難く、抽象度も高いことから高等学校ではじめて学習する。表中の網掛け箇所（高等学校学習事項）が指し示すように、2、3 の発展的な事項をのぞけば、電磁気学における基礎・基本はそのほとんどを小中学校理科で学習するといっても過言ではない。

このことから、小中高等学校における学習内容の系統性に十分に配慮した教材の提示、しかも、その後の学びにつながる方法論の開発が 3 つの校種を俯瞰する重要な課題であるといえる。

表 1. 電気・磁気分野学習項目一覧表（小中高の流れ）

小 学 校	中 学 校（第一分野）	高 等 学 校（物理）
3年	[電流の流れ]	[電 界]
・電気を通す物と通さない物	・静電気と電流	・電荷と静電気力
		・電界とその性質 ・電位とコンデンサー
4年		[電 流]
・電気の通り道 ・乾電池の数とそのはたらき ・光電池の働きを調べよう	・電流，電圧 ・直列，並列回路の電流と電圧 ・オームの法則と電気抵抗 ・回路全体の抵抗	・電流と抵抗 ・直流回路 ・キルヒホッフの法則
5年	[電流の働き]	
・電熱線と電流	・電流による熱，光 ・電力と熱量，光の強さ	・電流と仕事 ・半導体
6年		[電界と磁界]
・電磁石と電流	・磁界と磁力線，電流による磁界 ・磁界の中の電流が受ける力	・電界と電流 ・電流と磁界 ・磁界が電流に及ぼす力
		[電磁誘導と交流]
3年	・電磁誘導，誘導電流	・電磁誘導
・磁石につく物，つかない物 ・磁石の極の性質		・交流 ・電磁波

（注）表中，高等学校での網掛け部分は，中学校での既習項目を指している。

本実験教室を実施するにあたって、この実験教室が、小学校教員にとっては、子どもの理解を深めるための一助となるよう、「先生用の理科実験教材づくり」につなげることもまた目標の一つであった。一つ一つの現象が他のいろいろな現象と関連していることがわかり、系統的な知識の総体の中で位置づけられる教材づくりは、小学校だけではなく、続く中学校、高等学校、そして大学教育への展望につながる。特に、小学校で学ぶ電気・磁気において、「ものづくり」を通して「なぜそうなるのか」を考える科学的な見方の育成は、科学技術立国を謳うわが国の未来像につなげるには重要な視点であり、それは具体的なものに接すること、体験することを、日々の教育実践の中に位置付けてこそはじめて可能になる。科学と技術の融合、すなわち未来指向型の実学という方向性は、科学と技術の新しい展開として、いずれ学校理科の中にしっかりと根を張るべきものである。

初等中等教育段階でそのような教育をほとんど受けてこなかった学生がいる一方、大学の理系に進学した学生の中には、「中学・高校で先生が多く興味深い実験をしてくれたのが理系に進学した動機だったが、大学の授業が数学的扱いばかりで現象に結びつかず理系への興味が薄れた」という学生がいる。初等中等教育段階で育かれたものを、高等教育はしっかりと受け止め、足りないものは埋め、発展させられるものは発展させていくことが必要である。大学全入時代をむかえ、大学教育（教養教育）における科学教育は、理系学生に対する専門への橋渡しという位置づけに加えて、全ての学生に対し、しっかりとした科学リテラシーを持たせて社会に送り出す役割があるだろう。

本実験教室での様子は、教材の有効活用という視点から、その全てを録画・編集を行い、e-learning 教材として完成させるプロジェクトの一環として位置づけている。さらに、開発した実験教材は、小学校だけではなく大学教育（教養教育）にも使えるような質の高いものを目指している。現在、NPO 法人あいんしゅたいんの HP<sup>注1)</sup>からは、そのダイジェスト版を受講者全員に見られるようにしているが、近い将来、これを大学教育にも利用できるようにという目標もまた視野に入れていることを触れておきたい。

なお、この実験教室への要望や、実験に関する質問に対応すべく Q&A を HP 上に作成し、専門家の立場から、小学生にも分かりやすく、かつ科学の本質を伝えることができる仕組みを構築する一助とした。

### (3. 2) 「電気・磁気」の理解に向けて

#### (3. 2. 1) 電磁気現象を理解することの困難さ

とりあげたテーマである電気・磁気は、他の分野と比べて、肉眼で捉え、肌で感じるのが難しく、小学校理科では最も分かりにくい分野とされている。しかし、21 世紀は電気の世紀と言われるように、現在、電気・磁気はいろいろな形で応用され、日常生活には欠かせない。これらは、中学校、高等学校、そして大学へと引き継がれ、さらに進んだ科学への入口となるテーマであることから、本実験教室では、可視化をモチーフとしながらも、電気・磁気分野を次のような構成とした。

- ①豆電球に明かりをつけよう (第一講)
- ②磁石につくもの・つかないもの (第二講)

③電気を流して磁石をつくろう (第三講)

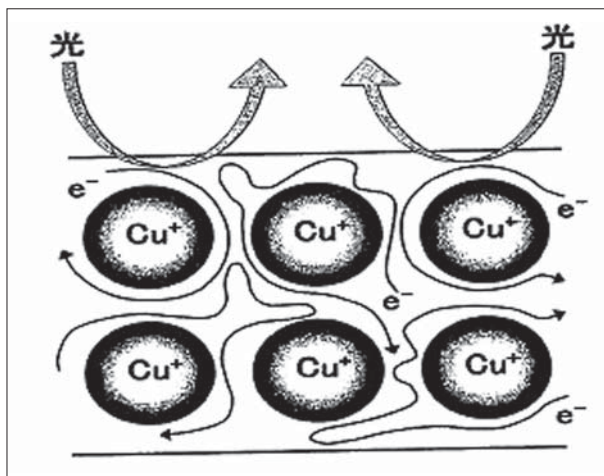
④磁石を動かして電気をつくろう (第四講)

⑤電気のいろんな使いみち (第五講)

電気・磁気を自ら体感し、また見て分かるようにするにはどうすればよいか。歴史を振り返ると、電気と磁気とを区別することすら相当な時間を要したことがわかる。これらの概念が区別され(①, ②), そして、それらの相互関連が「電磁誘導」という形で理解される(③, ④)には、多くの科学者が関わり謎解きをしたという経緯がある。その最大の理由は何か。電場・磁場という、従来のものとは非常に異なった概念(「場」の概念)を構築するのに手間取ったからである。このことはまた、電磁気現象を「可視化」することの困難さをも意味している。以下、各講における課題と問題点について言及する。

### (3. 2. 2) 第一講の特色と課題「電流の理解に向けて」

電流というものを子ども達はどう理解するのであろうか。それにはまず、電流を通すもの通さないものに直に触れることが出発点になる。そこで、金属は電流を通し、それ以外の多くは電流を通さないことを確認することから始まる。金属ではないが、電流を通すものとして石墨(黒鉛)もあるのだが、これは理解がなかなか難しい。さらに、現象は二者択一ではない。電流を「流す、流さない」ということ自体、厳密には連続的だからである。ここでは、テスターを用いて、まずは二択の問題として提示することとした。テスターとは「電気が通ったかどうか」を確認するための可視化の道具でもある。このテスターとしては、それ自身ブラックボックスではあってはならないという配慮から、今回は豆電球(約8Ω)の点滅を用いた。豆電球では、1.5Vの乾電池1個を使うと、大体0.2A(200mA)程度の電流が流れる。ところが、LEDを使うともっと微弱な電流(色によっても違うが、2Vで大体10mA~15mAであり、豆電球の場合のほぼ10分の1以下の電流)で灯りがつく。このように、「可視化」と言っても、どの程度の電流について測定するかで使用する道具が違ってくことを意味する。親子理科実験教室では、豆電球を用いたテスターで、硬貨、アルミホイル、サランラップ、さらに、鉛筆の芯、金色の折り紙などを調べて、電気を通す条件を考えさせた。



武田邦彦「リサイクル幻想」より  
図2 金属の特徴

電流を通すものは、多くは金属である。「どうして金属なのか」を可視化したのが金属の自由電子を描いた図<sup>2)</sup>である。この可視化した図は、電子という概念を必要とするのだが、こうした図が描けること自体、実は金属の構造が本人には「見えている」証ではないかと考えられる。

電子を肉眼で捉えることは難しい。しかし、その働きから電子の存在に迫るという理解もまた、我々の目指す「可視化」の有効な方法である。ただ、原子や分子というものをまだ学習していない子ども達がこれをどう受け止めたかについては、別稿で議論する「まめ磁石」による「体感する自然現象」という課題とかかわって、認識の発達とも深く関連しているようである<sup>3)</sup>。

### (3. 2. 3) 電流の可視化と水流によるアナロジー

次の問題は、電池のつなぎ方によって電圧と電流量の違いを可視化することである。電池のつなぎ方によって豆電球の明るさが異なることを実感し、電流量（アンペアで示される）の違いを理解させる。電流は目に見えないので、それを水流によって可視化することを試みる。このとき使った「ヘロンの噴水」教材については後で論じる。

### (3. 2. 4) 第二講の特色と課題「磁石と磁場」

磁石の性質（磁極があること、磁場ができることなど）の確認と磁化するものとししないものの点検を行う。一般に電流を流すものは炭素系を除くと、金属光沢をもつことがその特徴である。しかし、室温で磁化する物質は少なく、単体では鉄・コバルト・ニッケルに限られる（小学校理科では鉄以外はあまり取り上げられない）。物質中の原子のスピンが揃うということは、N極の近くにN極が、S極の近くにS極が、横並びにそろうことであるが、斥力が働くので一般にはこの状態は不安定である。それは、棒磁石を横に並べるとよくわかる。原子のスピンの向きは、ばらばらな方が安定であり、現実の物質ではそのほとんどは磁石にならない。

物質の磁気的性質は自然のもっとも基本的、一般的な性質の一つであるが、親子理科実験教室では、磁石に引き寄せられる代表的な物質として身近にある鉄とニッケルを取りあげた。ここで、磁石の性質をどう理解させるかが問題になる。電池に+極と-極があるように、磁石にもN極とS極がある。しかし、電池の場合には、2個直列につなぐと、電池が1個の場合よりも豆電球が明るく灯るが、磁石の場合には、N-S-N-Sと直列につなぐと、継ぎ目（S-Nの部分）の部分ではS極とN極が打ち消しあって磁場は弱くなり、その部分では軽いクリップさえも引きつけない。一方、電池の場合には、直列につなぐと豆電球の明るさが増す。逆に、並列につなぐと豆電球の明るさに変化はないが、磁石の場合、N極とS極の向きをそろえて並列に並べると磁場は強くなる。電気と磁気を比較して教える場合、この違いをどう扱うかが重要になる。この点については、別稿で紹介するまめ磁石のところで述べることにする<sup>3)</sup>。

実験教室では、日頃使っている磁気カードが磁場を利用していることを、磁性流体（微小な磁石を溶かした液体）や鉄粉を用いて可視化することによって直接観察した。そこに描かれた「暗号」が浮き出てくることも可視化によって体感できたという意味で、本教材は大変有効であることが認められた。

これらの体験を通して、目には見えなくても、磁場などの存在を身近に感じ、電流の流れや、磁石の中にある原子の振る舞いを感じることは、初等中等教育だけでなく、それに連なる大学教育にも大きな影響を与えるのではないか。電磁気学を集大成したマクスウェルのファラデー評価にも見られる「直感」重視の姿勢も含め、これらの点については別稿で述べることにしたい<sup>3)</sup>。



### (3. 2. 5) 第三・四講の特色と課題「電流と磁石の相互関係（電磁誘導への入門）」

直線電流を流すことによって、その周りに磁場（方位磁針が影響を受けて動く環境）ができる。これも、方位磁石を用いての磁場の「可視化」である。今回これを体感させる目的で、「パスカル電線」（杉原和夫（前京都市青少年科学センター指導主事）開発）を用いた。実は、小学校理科では、コイル状の電線が作る磁場がいきなり登場する。直線電流の作る磁場は中学校にならないと出てこない。そこで、パスカル電線という直線からコイル状まで、その形状が可変な素材を使用し、直線電流から電磁石のしくみへと無理なくつなげることを試みた。なお、パスカル電線については注を参照されたい<sup>注2)</sup>。

エルステッド（1820年）から始まる電磁誘導現象は大学教育にもつながるのだが、歴史的には、電流の流れる電線の周りに発生する磁場は複雑であり、磁場の模様をさし示す磁針は、これまで誰も考えたことのないような仕方でも動く。その規則を発見するには、相当な実験を重ねた末に、ビオやサバル、アンペールの発見につながり、やがてはファラデーによる発電のシステムへと発展する。これが今日の電気を利用する様々な文明の利器へとつながっていくのだから、学校理科を俯瞰する継続的なテーマでもある。本実験教室での試みは、中高で学ぶ直線電流や大学教育への橋渡しができないかという課題への挑戦でもある。

## 4 なぜ可視化の視点が必要か「水流モデル：ヘロンの噴水電流模型」

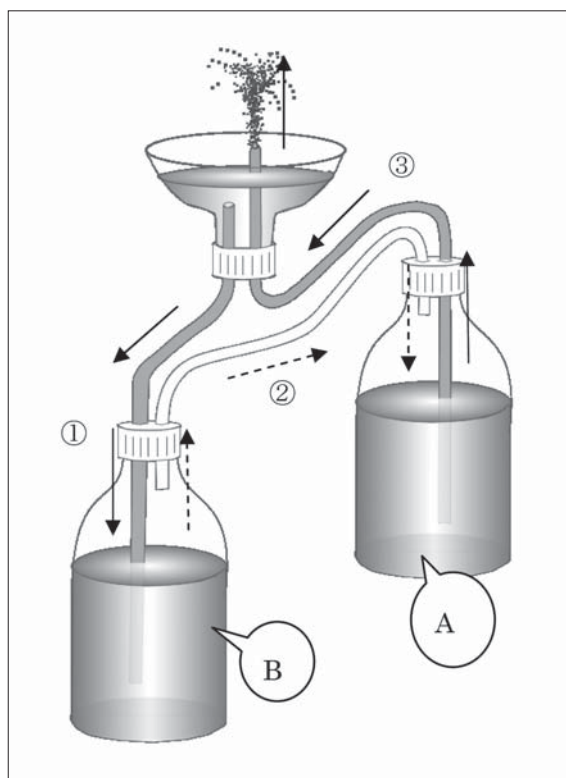


図3 ヘロンの噴水

実感をともなった理解の指導原理として、見えないものを可視化することを含ませることは、多くの学校教員の認めるところであろう。本実験教室では、電流を可視化するための道具として電流を水流として具現することを試みた。水流モデルでは、導線の中を流れる電子の代わりに、チューブの中を流れる水が主役となる。

豆電球に電池をつないで明りを灯す実験を水流モデルで再現するために、ヘロンの噴水を取り上げた（図3参照）。ヘロンは、エジプトのアレクサンドリアの技術者で、蒸気タービンなど、蒸気で動く器具の発明でも有名だが、三角形に関するヘロンの公式にみられるように数学にも長けていた。有名なヘロンの噴水は、水を入れた容器とつながった管を通して出る水が、容器の水面より高くまで噴き出す玩具である。このヘロンの噴水を

使って、電流模型を作ろうというものである。このために容器を身近なペットボトルで作る工夫がなされている。

さて、ヘロンの噴水の機構だが、図3にみるように、(①)まず上の噴水の受け皿にある水がチューブを伝って下のボトルBに流れ落ちる。すると、(②)水面が押し上げられ、上に溜まった空気がチューブを通してボトルAに入る。すると、ボトルAの上部の空気圧が上がるので、下部に溜まった水面が押し下げられる。その結果、(③)ボトルAにある水に漬かったチューブから水が押し出され、噴水が吹き上がる。吹き出た噴水の水は、受け皿に落ちて、再びチューブを伝ってボトルBに流れ落ち、水が循環する。ボトルA、Bを一体として捉えれば、これは閉じた回路を電流が循環するのに相当する。

実験では、水を橙色に着色して、水流が見えやすいようにした。電流回路との比較では、噴水が豆電球に、ボトルA、及びボトルBの水位差が電池の電位差（電圧）にそれぞれ相当する。ヘロンの噴水は、一見すると永久機関のように見えるが、そうではない。次第に上のボトルに溜まった水は減少し、その分、下のボトルに水が移動していく。

ボトルBとボトルAの水面の高低差に相当する水の位置エネルギーが、この噴水の駆動力（電池の電圧に相当）である。両ボトルの高低差を大きくすると、噴水はより高く吹き上がる。電池の直列と並列のちがいは、ヘロンの噴水の水の量や高さの違いとして理解できるのである（図4）。

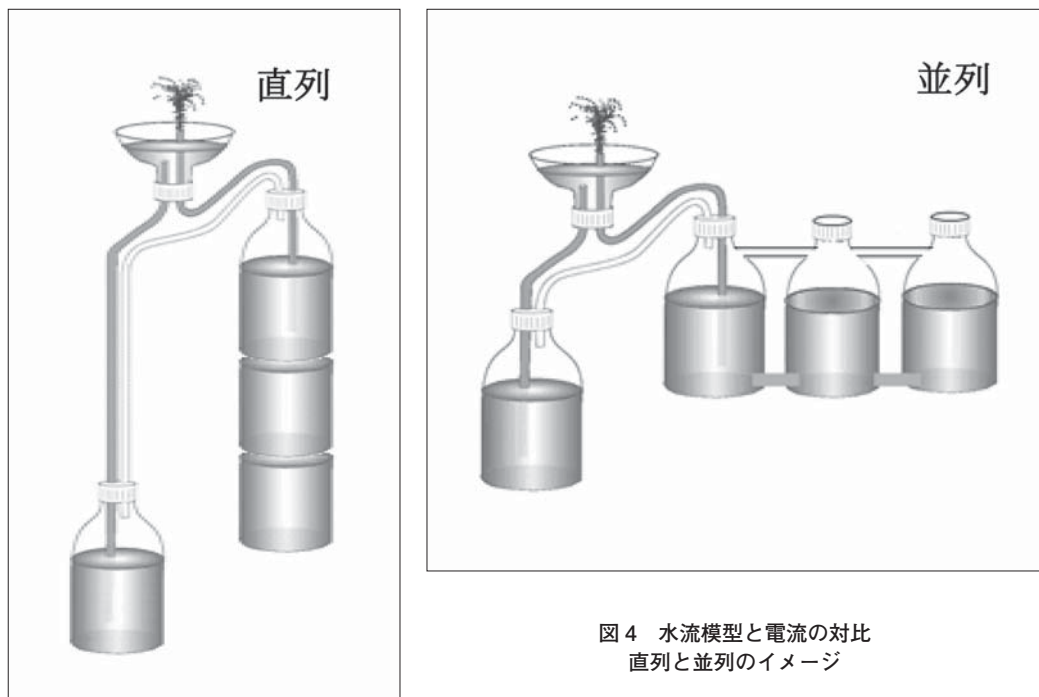


図4 水流模型と電流の対比  
直列と並列のイメージ

このモデルの利点は、電池の直列と並列による電流量の違いを可視化できることにある。すなわち、上のボトルを2つ用意し、それらを縦にチューブでつなげば電池の直列に相当し、一番上

のボトルに溜まった水の位置が、一番下のボトルに溜まった水の位置に比べて約2倍高くなる（即ち、電圧が大きい）ため、噴水は約2倍高く吹き出す（実験教室では、上のボトルは1つのままとし、電池の絵が描かれた円筒の台に上のボトルを乗せて位置を高くすることにした）。また、上のボトルを横に2つつなげば電池の並列に相当し、噴水の勢いは変わらず持続時間は2倍になる。このヘロンの噴水も、暫くすると、上に溜まっていた水が枯渇して噴水は勢いを失い、やがて止まる。これは、正に電池切れの状態に相当する。

このように、ヘロンの噴水は、電流・電圧の概念や電池の直列・並列といった違いを（水に色を付けたことも手伝って）目で見える形で教えてくれる非常に良いモデルであるが、しかしこの水流モデルにも限界がある。例えば、電池に豆電球を導線でつなぎ、回路のスイッチを入れた瞬間に豆電球は光る。したがって、回路の中を電流が流れる速さは、一瞬（光速）であるかのように見えるが、実はそう単純ではない。電流の担い手は電子であるが、導線（銅線）の中を電子が移動する速さは毎秒約0.1mmである。この一見矛盾した電流（電子）の振舞いを理解するには、電磁場の概念が必要になる。電気回路を閉じた瞬間に、付随する電磁場の変化が空間を伝わる速さが光速であり、それが電池から離れた豆電球を一瞬のうちに点灯させることになる。一方、ヘロンの噴水のような水流モデルでは、水圧や気圧により押し出された水がチューブの中の水を押し、その連鎖で水が先へ先へと送られる。したがって、その伝播速度は音速（水中では毎秒1.5km）程度であり、光速（毎秒30万km）とは大きく異なる。水流モデルでは、回路（チューブ）をつないだ瞬間に水が噴出するのでもなく、水流に付随した“場”も存在しない。

さらにまた、この水流モデルでは、電線のつながり方からすると、いったん水流はペットボトルの中の空気圧として伝搬し、それがもう一方のペットボトルの水を押し上げているのであり、「電流そのもののつながり」を直接可視化してはいない。

しかし、ここで大切なことは、電流という見えないものを水流モデルを用いて可視化することにより、大きな副産物、即ち、水流モデルでは表せない本質的な違いである、電流に付随した場の概念を我々に気付かせてくれるのである。今では、電流を使った機器は我々の身の回りには余りにも多く、一方で電流自体を目にすることがないため、その物理現象の本質に気付かないばかりか、表面的な理解で満足してしまっている状況にある。この「場」という概念は、大学生のみならず、研究者もまた誤解している場合が多く、大学教育ともつながるものである。理科教育として、その本質を分かりやすく伝えようとしたとき、可視化の作業を通じて、教えられる側のみならず教える側にとっても新しい気付きを感じる人が多い。

## 5 大学教育への提言

### (5. 1) モデルの効果とその限界

我々は、これまで科学の力（素材や論理）を使って、みえないものを「見える」ようにしてきた。豆電球に導線をつなぎ、これに電池をつけると豆電球が点灯する。このとき児童は、電池、豆電球、・・・と、個々の現象に目を奪われがちで、何が原因で、どのようなメカニズムで豆電球が光ったのか、想像をたくましくするだけである。「電流が流れたからだ」と「答え」を伝えても、児童は、依然として、電流ってどう流れるのだろうかという怪訝な顔つきで導線をながめているだけか

も知れない。

このとき、導線の中を「水」が流れていると言えばどうだろう。きっと、回路を端から端までたどるに違いない。電流を水流に置き換えて、水流モデルで目の前に生じている電流をイメージするだろう。

科学の先人達がそうであったように、子ども達もまた、たとえ水流と電流という異なる現象であっても、獲得したモデルを用い説明しようとする。まずは、子ども達に考える術を与え、そしてその後、子ども自身が、そのモデル（初期モデル）に対して適応限界を感じるようにし向けることが大切である。

水流モデルをはじめ、モデルには必ず適応限界がある。電流の実体は電子であり、この電子の運動は水流モデルでは理解できない。水流モデルに固執し続けるならば、新しい概念形成にとっては、今度は阻害要因としてしか作用しない。「回路のスイッチを入れた瞬間に電球が点灯する」という日頃子ども達が目当たりにする現象は、水流モデルなどの初期のモデルを超え、電磁場の変化が空間を伝播するという認識に達することではじめて理解できる。このように、授業の場では、常に、学習者の理解にあわせた、本質的理解にせまるモデル（可視化モデル）自身の発展・成長を図らねばならない。

大学一般教育にとっても、物理などのように抽象度が高く理解が難しいと思われる科目では、可視化という手法を取り入れ、少しでもイメージしやすいものにしたたり、またリアリティを感じられるように擬人化したりする手法は、今後ますます重要になるだろう。

## (5. 2) 初等中等教育段階から大学教育への系統的な理解への模索

ここで議論してきた可視化、及び可視化の進展については、いわゆる「実体可視化（在るものを見る）」を経て、「概念の可視化（見えないものを見る）」へと向かうことで、この方略が小中高등학교から大学教育へとつながるのではないかと期待できる。その意味で、ここには、大学教育（導入教育を含む）をも含む学びの継続性がある。

実感を伴う（誘う）理解にも、実は学習者の発達段階、いわゆる「学びの適時性」に配慮した連続性と系統性があるだろう。だとすれば、たとえば

①小学校前期段階（6歳から11歳まで）の保存概念を基礎とした「実体認識としての可視化」

②小学校後期段階（11歳以降）の「抽象的概念の実体化としての可視化」

という可視化モデルの流れが想定される。

「実体認識としての可視化」から「抽象的概念の実体化としての可視化」には、学習者の成長に伴って可視化モデルもまた成長するという新しい視点が含まれており、可視化モデルに対して揶揄される問題、例えば電流に関していえば、「水流モデル」はその後の学びである「場の概念」定着にとって阻害要因でしかないといった、いわゆるモデルの限界に対して一定の示唆を含んでいると言えよう。本実験教室によって、学習者の認識の深まりとともに、それと可干渉的にはたらく可視化モデル自身の成長というより動的な視座が得られたことの意義は深い。

## 謝 辞

親子理科実験室開催への支援と、話題提供を頂いた吉川研一理学研究科長、中家剛、田中耕一

郎、水崎隆雄、小山田耕二の諸先生に深く感謝いたします。さらに、運営組織面を支えて頂いた NPO 法人あいんしゅたいんのスタッフの皆さん、特に、坂東事務局長、高橋事務主任、また教材についてアドバイスを頂いた藤原清先生（NPO 法人サイエンス E ネット事務局長）、加藤利三先生（サイエンスクラブ理事長）、杉原和男先生（前京都市青少年科学センター指導主事）、TA として協力頂いた京大理学部大学院生のみなさんに深謝致します。

この取り組みの中心テーマである電磁気学の議論をリード頂いた松田卓也先生にも感謝いたします。講座講師として常に子ども達を導いて頂いた松林昭先生、ボランティアで駆けつけて下さった高見雄一先生、さらに、議論の労を惜しまず、ご支援いただいた小山田研究室の皆様感謝します。

#### 【注】

- 1) NPO 法人あいんしゅたいんの HP の URL は下記の通りである。  
<http://jein.jp/activity-report/educational-material.html>
- 2) パスカル電線とは、前京都市青少年科学センター指導主事杉原和夫氏が開発した 10 本の細い芯線を皮膜でまとめたビニル多芯電線をいう。全長 60m の電線を 6m ずつの 10 芯電線とすることで実質 10 周のコイルとなり、またその電流も単独で用いる 10 倍もの大電流を得ることができる。

#### 【参考文献】

- 1) 山下芳樹『理科は理科系のための科目ですか』森北出版、2005 年。
- 2) 武田邦彦『リサイクル幻想』（文春新書 131）文藝春秋、2000 年。
- 3) 坂東昌子、山下芳樹、上田倫也、石尾広武、川村康文、前直弘「擬人化と体験学習」『京都大学高等教育研究』16 号、2010 年。

## Visualization of Natural Phenomena

– Experience of Children Classes –

YAMASHITA Yoshiki (Professor, Faculty of Social Sciences, Ritsumeikan University)

BANDO Masako (Chairman, NPO The Scientific Education Exchange: EINSTEIN, Institute of Fundamental Science)

ISHIO Hiromu (Researcher, Graduate School of Information Science, Nagoya University)

UEDA Tomoya (General Affairs Department, ZKAI Co., Ltd.)

KAWAMURA Yasufumi (Professor, Faculty of Science, Tokyo University of Science)

MAE Naohiro (Executive Assistant, Excellence in Higher Education, Kyoto University / NPO The Scientific Education Exchange: EINSTEIN)

### Abstract

We report what we have learned from a series of elementary-level classes, which have been organized as a challenge in cooperation with the NPOs and the Faculty of Science of Kyoto University. In the classes, we performed an education program for children to experience scientific experiments with support by highly advanced experts in the research fields. Findings from these activities, may suggest indications to early stage education programs for university students.

After reporting some of the knowledge we obtained, we propose a problem which is important in the smooth connection between education in elementary schools and early stage education in universities. We choose electromagnetism as a theme and argue about the importance of visualization as well as an educational material which may lead to our cognitive conflict.

### Key words

Visualization, Science classes, Electromagnetic theory, Science of Science Education