

擬人化と体験学習

坂 東 昌 子

(NPO 法人知の人材ネットワーク・あいんしゅたいん 基礎科学研究所)

山 下 芳 樹

(立命館大学産業社会学部)

上 田 倫 也

(大阪大学大学院理学研究科)

石 尾 広 武

(名古屋大学大学院情報科学研究科)

川 村 康 文

(東京理科大学理学部物理学科)

前 直 弘

(京都大学高等教育研究開発推進センター／NPO 法人知の人材ネットワーク・あいんしゅたいん)

Personalization of Nature

Masako Bando

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

Yoshiki Yamashita

(Faculty of Social Sciences, Ritsumeikan University)

Tomoya Ueda

(Graduate School of Science, Osaka University)

Hiromu Ishio

(Graduate School of Information Science, Nagoya University)

Yasufumi Kawamura

(Faculty of Science, Tokyo University of Science)

Naohiro Mae

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

Summary

We propose a mini-magnet model as an example for a possible method of education to help to understand magnetism. We show how this mini-magnet model works in understanding the various characteristic features of magnets, which were found to be quite different from those of the electric properties of materials. We performed games using mini-magnets in a series of children's classes with their parents, which were organized with the collaboration of JEIN (NPO) and the Faculty of Science of Kyoto University. We have experienced and received various suggestions on essential ingredients not only for early-stage education program but for education programs for university students. We have also learned that, for children, personalization may be a very effective way to understand natural phenomena.

キーワード：擬人化、まめ磁石、電磁気学、理科実験教室、教育方法

Keywords: personalization, mini-magnet, electromagnetic theory, children's classes, education method

1. 擬人化による理解

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、小学生対象の「親子理科実験教室」を京都大学理学部と共催で実施してきた。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。そのいくつかの話題を提供することによって、初等中等教育からのつながり・発展という位置づけの下、大学における科学教育への問題提起を行いたい。この親子理科実験教室では、目には直接見えない自然の構造を捉えるには「見える」目（心眼）を持つことが重要であるとして、まず対象をしっかりと見つめ（現象の把握）、次に見えないものをイメージ化、モデル化（可視化）することをその出発点として、種々の教材（ここでは主に電磁気に関する教材）を駆使して可視化する試みを行ってきた（山下ほか、2010）。ここでは、対象に入り込み、対象に自己投入をすることによって、より理解を深め、より具体的に生き生きと「見える」ための方略を考える。

そもそも擬人化するには、学習者が、自己と他者を識別できることを前提としている。人はまねることによって学習するのだが、「文化的学習としてのマネは、他者の行為の外側を自分自身の行為として再現するのではなく、他者の内側に入り込んで、いわば、その人の置かれている状況に対して「その人として」自然な妥当な行為をするとき、結果として「まねた」ことになっている（下線は引用者が施した）のだという（佐伯、1995）。つまり人は自分とは異なる他を認識するとき、はじめて学習としてまねることができるというのである。そのためには、まず子どもが他者と自己を見分けられるという段階に達している必要があり、そのことを前提として、相手の動きの生成原理に入り込み、そこから世界を見ることができなければならないのである。ここでいう相手は、人に限る必要はなく、対象を広げれば動植物でもいいし、さらには自然現象一般でもよい。この「もの（対象）の中に仮想的な自己を投入する」という認識方法を「擬人的認識論」と呼ぶ（佐伯、1995）。

ここで紹介するのは、「磁石等の対象に対して、その内部構造に自己を投入する」指導方法といってもいい。注意すべきは、これは、「リンゴの気持ちはよくわかる」といった、いわゆる感情移入とは異なるということである。あくまで対象のルールを理解し、「そういう環境の下では、そこにあるものはどう動くのか」という自然界の動きを理解することが必要である。

本稿の目的は、親子理科実験教室における実践の結果を考察し、初等教育における新たな教育形態として、擬人化・体験学習を提案し、高等教育をも含めて、擬人化の持つ教育的効果を論じることである。特に、親子理科実験教室で用いた「まめ磁石モデル」は、系統的な知識の総体の中で位置づけられる教材を通して、なぜそうなるかを考える科学的見方の育成とともに、具体的なものに接すること、体験することの重要性を教育実践の中で位置づける、という動機を踏まえた、新たな試みである。この試みが小学生にとってどのように受け止められ、どのように理解されたのか、それが磁性を深く体験することにどう結び付いたのかを振り返り、大学入学生に提供される科学教育での提案を試みたい。

2. まめ磁石モデルを用いた磁性の体験学習

現行の小学校理科では、電磁気学は、豆電球や磁石の性質から始まる。中でも磁気は、小学校理科の範囲では、磁石につくものをつかないものがあること、鉄釘の磁化現象、及び電磁石などが取り扱われる。これらのそれぞれの現象自体は、それほど複雑なものではない。例えば、磁石につくものは鉄しかないこと（コバルト・ニッケルに関しては小学校ではあまり扱わない）や、磁石でこずることによって鉄釘を磁石にできることなどは、実際に実験してみればすぐに分かるのだが、各現象を独立に知っていても、磁石の性質に関する統一的な描像を持つのは難しい。

電気の流れに関しては、水流モデルを用いることで基本的な電流の描像を把握することは比較的容易にできるが、これは物質中の複雑な電子の動きを自由電子で近似して記述しても十分成り立つことに起因する。もっとも、この範囲でも、電気抵抗や電流の特徴が「見える」ようになるには、擬人化による体験が有効であろう。それは後に述べるとして、ここでは、磁石についての擬人化として、「まめ磁石」を使った事例を紹介する。

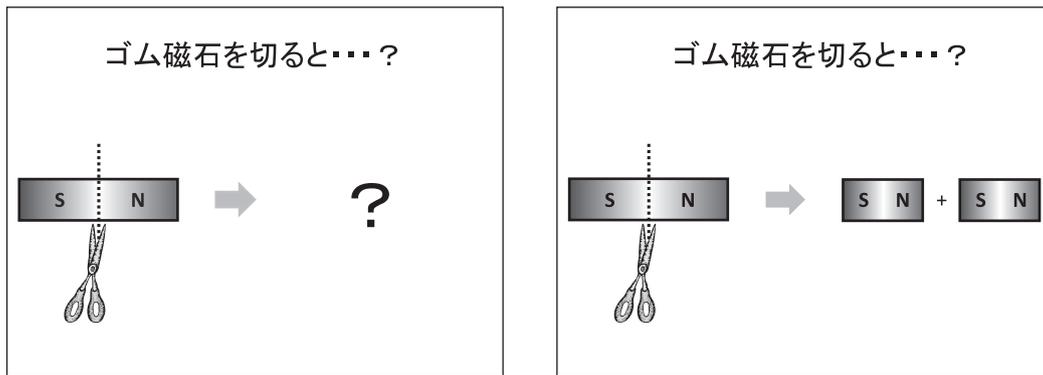


図1 切っても、切っても、磁石は磁石

2.1 磁石の性質

棒磁石をS極とN極の間に半分に分割すると、そのどちらにも新たにS極とN極が現れて、結果として2つの棒磁石になる。決してS極だけの磁石やN極だけの磁石にはならない。この現象は、両端にS極とN極がある長いゴム磁石をハサミで切って、これらの2つのゴム片がやはりゴム磁石になっていること、つまり、図1のように、磁石は常にN極とS極がペアで存在することを、方位磁石を近づけて実際に確かめることができる。これは、磁石のもつ基本的な性質である（第1の規則）。「切っても、切っても、磁石は磁石」ということを不思議に思う子どもは多い。この磁石の性質は、子どもだけでなく大人も不思議に思う現象である。

小学校理科では、磁石に関するいくつかの現象が羅列的に教えられるだけであり、その原理や、原理から事実を導く論理的手法までは至らない。身近な現象の科学的知識を身に付けるだけでなく、論理的に思考する能力を身に付ける工夫はできないものだろうか。

特に電磁気学は、電場や磁場が直接目には見えないだけに、この問題は深刻である。そこで、我々は、磁石に関する様々な現象から原理を導き出し、その原理を用いて系統的に磁氣的現象を理解させる方法として、「まめ磁石モデル」を提案し、親子理科実験教室で実践してみた。

2.2 まめ磁石モデル

まめ磁石モデルでは、まず「物質は小さい磁石の集まりである」というイメージを導入する。磁石の起源は、具体的には電子のスピンや原子団の磁気モーメントなどであることが知られている。従って、実際には、この「小さい磁石」は、原子程度の大きさである。しかし、小学生に磁石の性質を教えるに当たっては、このような詳細に触れる必要はないと考え、磁石の微細な構造には触れず、漠然と「まめ磁石」と呼ぶこととした。ここでいうまめ磁石とは、S極とN極を、その両端にもつ（第1の規則）ものとする。次に、第2の規則として、「同じ極同士は退け合い、異なる極同士は引き合う」という磁石の性質を、棒磁石を用いて認識させる。

これらの2つの規則、すなわち、まめ磁石はそれ自身2つの極を持っているという規則、及び他の強力な磁石が近づいたときには反対の極に引かれるという規則から出発して、様々な磁氣的現象をどこまで把握できるのであろうか。それを教室で教えるための方法として、自ら「まめ磁石」となることで、対象に入り込み、その環境の中での規則を理解するのである。例えば、強制力がない場合には、まめ磁石の集まりがばらばらな方向を向いており、全体としては磁石ではないが、もし、何らかの強制力や他の相互作用が働いて、同じ方向に揃った状態になれば、集団として磁石となる（磁化現象）。このことを総合的・系統的に理解出来る枠組みを、このまめ磁石モデルは提供していると考えられる。自分自身がまめ磁石になってこそ、「磁化」ということがどういうことかを体験することができるのである。

2.3 実験教室での実践事例（まめ磁石モデルによる磁石の示す多様な性質の理解）

実際にこのまめ磁石がどのようなふるまいをするか、親子理科実験教室での「まめ磁石モデル」の実践事例について紹介したい。ここでは、子ども達に小さな磁石の図を持たせて「まめ磁石」になってみることにより、まめ磁石の



図2 まめ磁石のゲーム

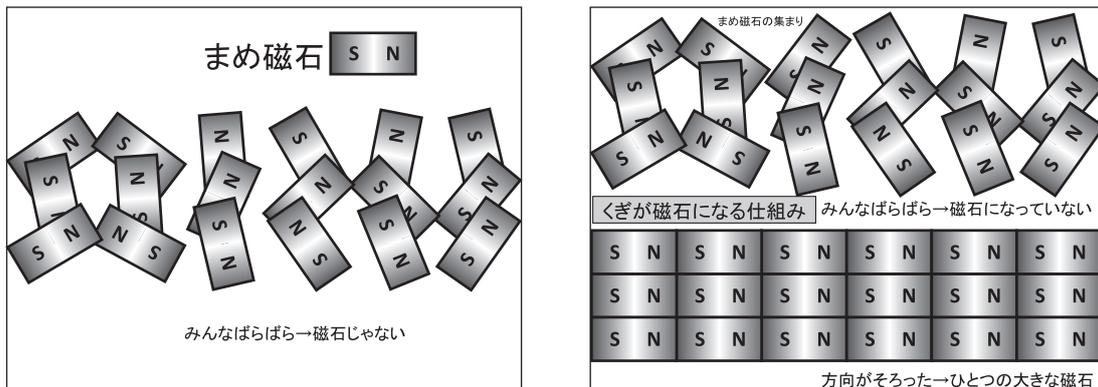


図3 まめ磁石の集まりとしての磁石の構造

集団がどのような様相を呈するかを体験させることを試みた (図2 参照)。

まず、子ども達を3列か4列に並ばせ、「強力な磁石が近づいたときの動き」を表現してもらおう。ルールは簡単である。近付いてきた強力な磁石の極に対して、自分の持つ小さな磁石の向きを変え、引き合う極の方を向ければいいのである。強力な磁石が通り過ぎたとき、鉄釘が磁化するように、子ども達の集団としての磁石の向きが揃う。こうして、自らの体験を通して、「磁石を使って鉄釘を磁石にすることができる」ことが発見できるのである (図3 参照)。そのとき、鉄釘の磁極がどうなるかも簡単に分かる。同時に、磁石を何度も同じ方向にこすりつけると子ども達の磁石の向きがますます揃ってくること、即ち強い磁石になることも困難なく理解できる。

また、時間が経つと、子ども達は疲れてきて、持っているまめ磁石はあちこちと向きを変えていくことも発見する。「ほら、みんな活発だから温度が高い状態になっているのですよ。」と伝える。実際、子どもが演じると特にこの傾向は著しい。大人ならじっとしているのに、子どもはじっとしている時間が短いのである。こうして、温度が高くなると「まめ磁石」がすぐに勝手な方向に向くことも実感でき、熱振動によるランダム運動は「まめ磁石」を演じる子ども達によって自然に引き起こされ、当初は期待もしていなかった熱振動の効果まで、自然な形で子ども達は認識できるのである。

さらに、子ども達の演じる鉄釘が磁石となっているときに、ひもを用いて真ん中で2つのグループに切り分けると、切り口の両側が別の極になっていることも発見できる。こうして「切っても、切っても、磁石は磁石」という磁石の不思議な性質を体験を通してしっかり納得させることができる。

ところで、この集団実験で、思いがけないことが起こった。それは、子ども達を座らせるのではなく、自由に動けるようにしたときのことである。このとき、子ども達は強力な磁石の方に向かって走り出して、強力な磁石にくっつくようにしたのである。この様子は、粉碎した磁石をペットボトルに入れ、しっかり振り回して各々の小さな磁石の向きをバラバラにしておき、その状態で、外から棒磁石でこする時の動きを再現していた。このようにして、まめ磁石モデルは現実の物理に対応していることが、子ども達によってごく自然に示されたのであった。

2.4 磁石で暗号を描く

親子理科実験教室では、時間的余裕が無く、これ以上取り組むことができなかつたが、磁石の様々な性質を理解するのに、このまめ磁石モデルは大変有効であることを付け加えておく。例えば、この教室では電車の切符などに使われる磁気カードには、実は磁石の性質が「情報記録用」として利用されていることが体験できる。まめ磁石の上に、強力磁石を一定領域だけに近づけると、その領域だけ磁極がそろうので、情報の記録された場所が見えるのである。したがって磁性をうまく利用して「磁区（磁石の向きが揃っている区域）」を作ったり、線を描いたりできる。このように、磁気カードに磁性流体を塗って模様が出てくることを確認させたうえで、それをまめ磁石モデルによる身近な体験として繰り返せば、より鮮明なイメージがわくだろう。

2.5 まめ磁石モデルによる「磁化する物質と磁化しない物質」の解釈

以下では、さらに発展して、大学における一般教育科目での科学教育や、後続の専門科目のイントロダクションとして提供される導入教育でも取り扱える磁性が、このまめ磁石モデルで解釈できることを指摘しておきたい。

電流を通す物質は金属や黒鉛など非常に多くあるが、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。このことは、まめ磁石モデルを用いると、次のように説明される。物質中のまめ磁石が揃った方向を向くと、N極の近くにN極が、S極の近くにS極が、それぞれとなりあうので、通常は不安定となる。それぞれのまめ磁石がばらばらな方向を向いている状態の方が安定である。こう考えると、現実の物質の殆どは磁石にならないことが容易に理解できる。「鉄などの限られた物質では、まめ磁石自身が作る磁場によってまめ磁石が揃った状態も安定となること」を理解することは無理だとしても、このような状態がごく例外的であることは理解することができる。

2.6 常磁性・強磁性

様々な磁性の中で、主なものとしては、常磁性・強磁性・反強磁性の3つが挙げられる。さらに、強磁性と反強磁性は、電子が局在しているか遍歴しているかによってそれぞれ2つに分けられるが、ここでは、常磁性と強磁性について、まめ磁石モデルを用いての説明を紹介する。

・常磁性

物質中において、まめ磁石がばらばらな方向を向いている状態が常磁性である。この状態では、外から磁石を近づけても、各まめ磁石にかかる磁力を平均すると、退けられる力と引かれる力が打ち消し合って零となり、磁石はくっつかないことが分かる。

・局在強磁性

物質中のまめ磁石が殆ど動かない場合において、まめ磁石が全て揃った方向を向いている状態が局在強磁性であり、磁石の性質を示す。物質中のまめ磁石と同じ方向に向いた磁石を外から近づけると、物質と外から近づけた磁石のそれぞれのまめ磁石間で引き合う磁力が発生することが分かる。逆の場合は退け合う磁力が発生することも同様に理解できる。ただし、鉄を含め、現実の磁石は殆どが局在強磁性ではなく、次に示す遍歴強磁性である。

・遍歴強磁性（バンド強磁性）

電子が物質中を動き回り、且つその電子のスピンによって強磁性が発現する状態が遍歴強磁性である。外から磁石を近づけるなどの操作によって外部磁場が発生し、各電子の磁気モーメントの平均値が零では無くなった場合に、各電子は周りの電子から磁力を受ける。その状態が外部磁場を取り除いても安定な場合に、遍歴強磁性が実現する。従って、まめ磁石モデルで遍歴強磁性を説明するには、まめ磁石としては電子のスピンではなく、微小体積中の磁気モーメントの平均値として想定すればよい。この解釈によって、遍歴強磁性の複雑なメカニズムを経ることなく、磁石の性質を系統的に教えることが可能となる。

3. 実験教室での結果の考察

まめ磁石を用いた実験では、思いがけない子ども達の振る舞いがみられ、磁石の様々な性質が表現できることが分かった。実験教室に参加した子ども達は、これをどう受け止めたのであろうか。アンケートの結果では、「楽しかつ

た「面白かった」という意見はたくさん出てきた。特に保護者からは「まめ磁石のゲームは圧巻でした」という賞賛の言葉も聞かれた。実際に、小学校4年生以上になると、それまでに磁石の性質を学校でも学んでいるので、この教室で、さらにその経験知が強化されたのであるから、「わかった」という意見が聞かれたのもうなずける。

しかし、この教室には、小学校1年生も幾人か参加していた。そして、電気と磁気のことを学ぶと、家に帰ってからも、「電流が流れるかどうか」「磁石になるかどうか」など、家の中のいろいろな物で試していることは覗かれた。「豆電球はどんなときにつくのか」をテスターで試している子もいる。また、磁石のS極同士をくっつけようとする、強い力で反発する何ものかが働いて近づけないこと、2つのドーナツ磁石の穴に鉛筆を通して、反発しあうのを発見したり、という風に様々な工夫をして飽きることを知らない。1年生の子どもでも、「まめ磁石になって面白かった?」と聞くと、「うん、面白かった」というのだが、もう少し突っ込んで、「まめ磁石になってみて、どういうことが分かった?」と聞くと、「よく意味がわからなかった」という反応が返る。彼らにとって、ゲームは楽しかったが、それがどのような意味を持っているのかは理解できなかったようである。この原因が、「自己と他人の識別が未成熟」だからなのか、この実験教室でのまめ磁石モデルを使う意味が分かるほど磁石の不思議に迫っていなかったからなのか、あるいは、説明が不十分なため内容そのものが理解できなかったからなのかは、この短時間の試みだけでは、十分に把握できなかった。科学的認識の段階的發展と子どもの学習内容の適時性、さらには提示するモデルとの関わりについては今後の課題としたい。

4. 先行事例

自然現象の擬人化モデルとして、学習者自身が原子分子などのミクロな粒子となり、自分の分身を対象の中に投入して対象の動きを感知する、という試みについては既にいくつかの先行事例がある。まめ磁石モデルのみならず、自然現象の擬人化を通して様々な場面で目に見えない世界が示す自然の仕組みを理解することができる。そのいくつかの例を紹介する。

4.1 電子模型と気体分子模型 (幼・小・中・高校生および成人対象)

サイエンス・コミュニケーション研究活動における、擬人的手法の実践を2つ紹介する。

1つは、「電気の気持ち」あるいは「電子の気持ち」というタイトルで実施しているものである¹⁾。学習者は小さな風船を頭の上にかざし電子になる。指導者は、巨大風船を金属イオンとみなし、これを両手に1個ずつ持って、ゆさゆさ振動させる(熱振動)。この電気抵抗トンネルのなかを学習者が電子の役となって、旅をする。まず、電気抵抗トンネルの入り口と出口で、人数が減ったかどうかを尋ね、電流は抵抗が大きくても減少しないということを学ばせる(保存の法則)。トンネルをぬけてきたときには、汗をかいてジュール熱を体感できる。その発展として、電気抵抗の式($R = \rho \frac{L}{S}$ [Ω])、つまり、抵抗の大きさ(R)は、電線の長さ(L)に比例し、その断面積(S)に反比例することを、「トンネルの長さ」とトンネルの入り口の広さ」という形で R が決定できることを体感できる。電気抵抗を直列に接続すると L を長くしたことに相当し、電気抵抗を並列に接続すると S を大きくしたことに相当する。例えば、3人の指導者で 3Ω 、5人の指導者で 5Ω とすると、 $3\Omega + 5\Omega = 8\Omega$ という関係を可視化でき、学習者の理解度は飛躍的に向上する。

次に、この巨大風船を使った授業実践として、分子運動論の授業に活用した例を紹介する。巨大風船を気体分子球とみなし、次々とアットランダムに巨大風船を学習者にあてる。学習者はブラウン粒子になったかのような体験をする。気体分子が壁と衝突し壁に力積(Fdt)を与えることも体験できる。学習者に容器の壁になってもらい、指導者が周期的に巨大風船を当て、ある特定の気体分子球が1秒間に何回衝突するかを体感することによって、1秒間あたりの力積が、実は、その力(F)に相当していることを学ぶ。その発展として、再度、気体分子の運動の観察者として空間のなかに入ってみると、同じ絶対温度だといわれていても、気体分子球ごとにいろいろな速度をもった巨大風船と出会うことになり、速度の異なる風船が飛んでいることを体感できる。

以上のように、物理学の学習内容の理解においては、学習者のイメージを豊かにすることが求められるが、この擬人的認識の方法は、学習者の内部に物理現象のイメージを構成することが可能となり、それにより物理現象の理解が深まり、より高い学習効果が得られることが期待できよう。

4.3 自発磁化と核分裂 (大学における擬人化授業)

大学一般教育授業で、受講生を原子や原子核に見立てて多人数授業で成功した事例を紹介する。

自発磁化、自発的対称性の破れを理解させるため、集団ゲームの手法を用いる。受講生を原子磁石とみ立てて、多数の粒子の集団が起す相転移現象、たとえば自発磁化という現象の面白さを体感させる。多人数講義の受講学生 (テレビに出演したときは約 700 人であった) に紙 (磁石の上向きを赤色の紙、下向きを白色の紙とする。極がどちらに向いているかを表す) をもたせ、原子磁石とする。最初は、好きな色を上にあげた状態から出発する。そして号令に合わせて、前後左右を見て多数の色に変えるというルールで動かす。何回か繰り返すと全員の色が揃う。つまり、全体の集団が磁石になる。最初上下ばらばらであったものが (上向きと下向き、つまり赤と白がほぼ同じ割合である状態、従って、上も下も同等だという上下対称な状態)、上か下かに偏って (つまり赤か白かの 1 色になって) 上下非対称な状態になり、自発磁化が発生したのである。このとき、磁石間には、「向きが揃った方がエネルギー的に安定」になるような相互作用が働いていることになる。つまり隣同士の磁石がお互いに相互作用するために、上下の非対称な状態になったのである。上のルールはそれを表現したものであった。

文系の学生たちに、このゲームをさせると、「ファッションの流行もこんなものですか?」とか「世論もこれに近いですね」とか、面白いことを言う。確かに、人間でも、2 つに分かれた意見のどちらかに賛成するかは、周囲が多数の方に賛成するほうが摩擦もなく安心だといった相互作用が働くのは、実感できる。それと同じ現象が起こるのである。これなどは、「リングの気持ちわかる」に近い印象を持つのもかもしれない。こうして、自発磁化を理解してくれるのだが、「これは何も強制力が働かないのに同じ方向を向いたのですが、磁石を外から近づけて、磁石の向きがそろるのは、他発磁化とでもいうのですか」という質問までしてくる。物質の全体の性質が、温度を低くしていくと、急に変わる現象の本質が明瞭に見えてくる (坂東、1992)。このように考えると、相転移という現象は実に興味深いはずである。

残念なことに、大学における教養教育や一般教育では、このような多体系の面白さを伝える授業を組んでいることは、まれである。それは、力学、電磁気学など物理学の基礎となるカリキュラムの習得に重点が置かれており、その基礎科目をマスターすることが大きな目標になっているからである。しかし、先の例でも指摘したように、自然現象のなかでも、多体系の示す多様な様相は実に興味深い。こうした多体系の動力学こそが、最先端の問題である素粒子の質量の起源や宇宙の初期の解明に結びついているのである。

こうしたテーマをもっと取り入れれば、物理学の面白さが伝わると思うのだがどうだろうか。南部陽一郎博士が、このメカニズムの面白さを実に興味を持って突き詰めたことで、素粒子論という世界に、この多体系の動力学を導入し、「自発的対称性の破れ」のメカニズムをしっかりと根付かせた。それができたのは、南部陽一郎博士が、素粒子論の専門家でありながら、豊かな「物を見る目」を若いころからしっかりと定着させていたこと、素粒子以外のテーマでも、面白いと思えば、深く追求するという探求心、分野の境界領域など気にしないで自然現象を楽しむコスモポリタンの精神を持っていたからであろう。とはいえ、博士がその「心眼」をどこで養ったかは、理科教育という観点からしても、更に興味深いテーマでもある (坂東、2010)。

また、受講生をウラン 235 に見立てて、ウラン核分裂実験のゲームも取り組んだ事例もある。この事例は、物理学会誌などにも紹介されているので、ここではその処方だけを資料として示すにとどめる。

ただ、1 つだけコメントしておきたい。この実験を体験した受講生が、受講して 1 年後、東海 JCO の臨界事故が起きたとき、「あの事故の意味すぐわかりました。現場にいる人はこういうこと知らなかったのですか? 僕らのように、ウラン核分裂実験をしていたらすぐ分かった筈なのに……」と言いに来てくれた。大学生ともなれば、小学生と異なり、あまり予備知識がなくても、擬人化実験によって、対象の中に自己を放つことは、いとも簡単なようである。「見える」という体験も、加齢による経験知がふえると、対象そのものの知識はそれほどなくても、わかりやすいものなのかもしれない。

5. まとめ (体験的授業と可視化教材の比較)

自然現象のより深い理解にとって、その表れである「現象」を可視化することは重要であり、また可視化モデルそのものの発展的展開によって、「概念の可視化」という、より高度な認識 (メタ認知) にも至ることができる (山下

教室で実験してみよう —— 核分裂シミュレーション実験

ウラン核分裂の起こるようすを、体験してみませんか！！

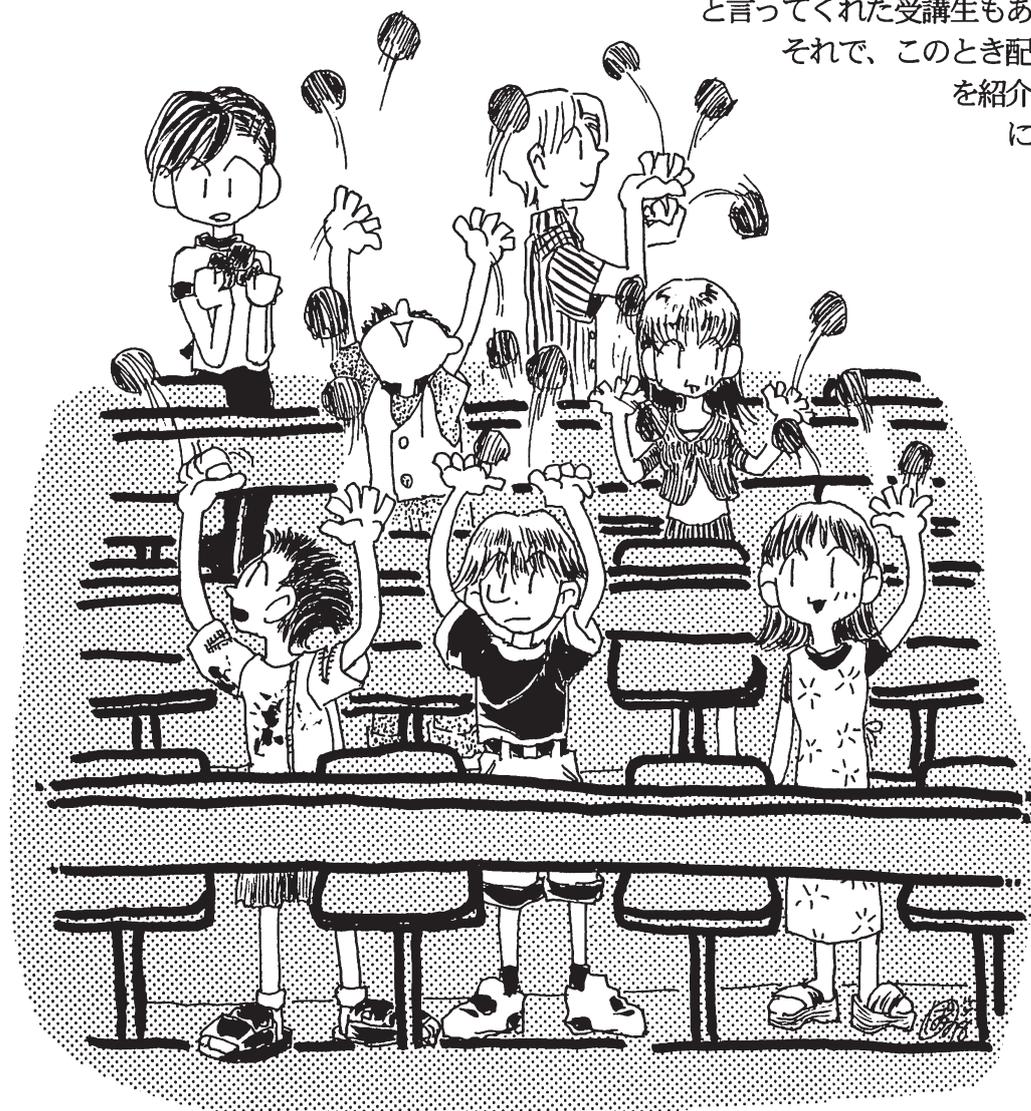
これは、多人数講義にぴったりの面白い実験なので、今まで何度か愛知大学で試みてきました。最初は、小豆で、次は飴玉で、また体育館を使って人間で、ためしてみました。

この実験は、日本物理学会誌上で紹介したら(47巻3号1992年 236ページ)、評判になって、いろいろな大学でやっているようです。しかし、小豆は見えにくい、飴玉は高くつく、体育館では手軽にできない、という意味で、まだ満足できませんでした。そこで、私たちは、2人で頭をひねり、これに改良を加えて、1998年5月に紙玉で実験しました。大成功でした。みんな面白がって、核分裂における臨界量も、連鎖反応も、制御棒の働きも、みんなよくわかってくれました。

「愛知大学の年中行事にしたらどうですか。」

と言ってくれた受講生もありました。

それで、このとき配った資料
を紹介すること
にしました。



実験の様子はビデオで記録してあります。飴玉を紙玉に変えたのは成功でした。ゴミ集め、掃除の問題が心配でしたが、みんなきちんと拾って帰ってくれました。また、あとで、実験のレポートを書いてもらうということもあって、みんなよく指示通りに動いてくれました。

資料 続き

坂東・中西合同実験+討論

原子核分裂の連鎖反応を理解する実験 : とき 1998年5月29日(金)午後1時20分集合
ところ 004教室

この実験は、わが同僚の長谷部教授がアイデアを出されたので、長谷部式実験と名付けておく。多人数講義にぴったりの面白い実験で人数は多ければ多いほどよい。このときのウランはウラン235である。天然ウランは殆どがウラン238であってウラン235はたった0.72%しか含まれていない。そのためウラン235の濃度が低く連鎖反応は起きない。原子爆弾用の燃料のときにはウラン238等を取り除いてウラン235を「濃縮」する。原子炉で使うときは「低濃縮」のものでよい。原子炉では反応速度をコントロールするために「制御棒」を原子炉の中に入れてたり出したりする。この制御棒は中性子を吸収する材料(吸収材)でつくってある。

連鎖反応の起こるプロセス

- 1 ウランは中性子があたると核分裂を起こし、軽い原子核いくつかに分裂して平均3つの中性子をだす。
- 2 飛び出した中性子がまた別のウランにあたるとまた核分裂が起こる。
- 3 こうして次々と連鎖的にウランが分裂していく。
- 4 原子爆弾→連鎖反応が爆発的に起こる。臨界量に達したとたんに爆発
原子炉→でてきた中性子を吸収材で減らして反応回数を減らす→原子力発電

実験は、学生1人1人をウランの原子核にみたてて、核分裂の連鎖反応がどういう風に起こっているかをじかに体験する方法である。中性子の代わりに3つの紙玉を投げ出してもらう。本当は中性子があたるとウランは分裂してもうウランでなくなるのだが、皆さんに分裂してもらう訳にはいかないので「紙玉3つ持っているときはウラン、紙玉を投げ出してしまったらもうウランではなくなった」と思って欲しい。

用意するもの

当日、チラシ・新聞紙(B4~A3サイズ)などをまるめた紙玉を1人9個づつ、コンビニの袋などに入れて持ってくる。飴玉より紙玉の方が安くつくし、大きくてわかりやすくあたっても痛くない。

実験のやり方

まず、テキスト・ノートなど身の回りのものは鞆の中にしまい、袋に入れた9個の紙玉だけを持って席をたつ。

- 1 全員が均等に散らばるよう、教室の前半分に移動する。座席1つに2人を目安にし、通路にも同じような間隔で並ぶこと。
- 2 袋から紙玉を3つ取り出し、手に持つ。
- 3 教壇から教室の中央付近に1つの紙玉を投げ入れる。
- 4 その紙玉のあたった人は自分の持っている紙玉3つを周囲に投げ出す。
- 5 それらの紙玉があたった人は自分の持っている紙玉3つをまた周囲に投げ出す。
- 6 だれにも紙玉があたらなければそれでおしまい!

実験は濃度を変えて3回繰り返すので、1回の実験では紙玉を3つしか投げずにはいけない。

実験上の注意

- ☆ 連鎖反応が有効に続くためにはみんながかなり密集する必要がありますが、以前の実験では学生がなかなか移動してくれず、「濃縮」にかなり時間がかかりました。
実験がうまくいくように、マイクでの指示には迅速に従ってくださるようお願いいたします。
- ☆ あとしまつ: 講義終了後、紙玉を1人9個づつ拾って必ずゴミ箱に入れて帰ること。
(「核廃棄物」をまき散らしたままで帰らないように!)

注意 この実験は、本物の核実験に比べて、ウランの数がせいぜい受講生の人数(出席者約700人)です。それに対してウランの原子の臨界量は、アボガドロ数のオーダーです。臨界量からはるかに遠い少ない原子で実験したことになります。つまり、未臨界実験ということになります。「未臨界実験ってなに?」がわかってもらえるといいですね!!

質問 核分裂のプロセスが何回ぐらい起こったか、今回の実験と実際のウラン核分裂とを比較してみましょう。(アボガドロ数 $6 \times 10^{23} \sim 3^{50}$ 、 学生人数 $700 \sim 3^6$)

ほか、2010)。可視化の方法は現象の明確な対象化であり、体験的授業には欠かせない要素である。特に、親子理科実験教室で実践してきた電気・磁気の分野においては、小中高等学校の学習内容の系統性という視点から、電磁現象の可視化教材の有用性を検討してきた。

さらに発展していくと、電磁誘導についても、いろいろな擬人化や可視化の教材が開発できそうである。単に分かり易い教材を構想するといった範囲に止まらず、科学的にも、エルステッドにより気付かれ、アンペールにより現象の整理がされ、さらに電磁力線概念の「可視化」により、「場の概念」に関してその本質的理解に鋭く迫ったファラディからマクスウェルという非常に重要な流れがある。

この場の概念については、磁力線として小学校理科に端を発し、高等学校物理においても重要になってくるのである。しかし、大学物理で学習するマクスウェル方程式までに至ると、どうしてもその美しさに魅かれて、力線表示のような「お絵かき」などは、どちらかというところ軽視する傾向がある。そうすると、大学教育では、さらに拍車をかけて、「実体的把握」ができなくなり、自然の生きた姿を取り逃がしてしまうことになりかねない。

マクスウェルが目指したものは、「電荷や電流によって電気力線や磁力線はどのように決まるか」であり、また「電気力線や磁力線の変化は、お互いどのような影響を与えるか」であった。それはまた、ファラディの生き生きとした問題意識そのものであった。この電場と磁場が相互に干渉し合う自然の営みは、今日、電気の世紀とまで言われる現代社会にとって、その礎となる重要な概念形成につながるものである。

以下は、マクスウェルが、その著「A Treatise on Electricity and Magnetism (1904)」で、ファラディを評した箇所である。

As I proceeded with the study of Faraday, I perceived that his method of conceiving the phenomena was also a mathematical one, though not exhibited in the conventional form of mathematical symbols. I also found that these methods were capable of being expressed in the ordinary mathematical forms, and thus compared with those of the professed mathematicians.

For instance, Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing a space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance: Faraday saw a medium where they saw nothing but distance: Faraday sought the seat of the phenomena in real actions going on in the medium, they were satisfied that they had found it in a power of action at a distance impressed on the electric fluids.

When I had translated what I considered to be Faraday's ideas into a mathematical form, I found that in general the results of the two methods coincided, so that the same phenomena were accounted for, and the same laws of action deduced by both methods, but Faraday's methods resembled those in which we begin with whole and arrive at the parts by analysis, while the ordinary mathematical methods were founded on the principle of beginning with the parts and building up the whole by synthesis. (Maxwell, 1904)

下線部には、場の概念を誕生させたファラディへの高い評価が読みとれる。「ファラディは、その『心眼』によって空間全体に広がっている力線を感じた。数学者ときたら、その同じ空間に作用しあう力の中心しか見いだせないのに、だ。空間とは、数学者にとっては空っぽの入れ物に過ぎないものだったが、しかしファラディには力を伝える『媒質』がしっかりとみえたのだ。そして、その現象のよりどころとして、彼はこの媒質を伝わっていく作用そのものに求めようとしたのだ。それに引きかえ、数学者は電荷にはたらく力の大きさを知ることだけでも満足してしまっている。」

後半では、このファラディの方法論について次のように語っている。ここに、可視化の精神の一端がある。「通常の数学の方法は、細部から入って全体に至るという『総合』という手法をとるのに対して、ファラディの方法は、まず全体をつかみ、そして細部に至るという『分析』という手法を用いている。」

マクスウェルがファラディを評価して用いた形容、すなわち「ファラディは心眼で現象をみる」とは、まさにファラディの分身を現象の中に投影し、見えないもの（関係性）を見ようとした、まさに「概念の可視化」の術をファラディは蓄えていたことをさしている。

ファラディからマクスウェルへの発見の歴史を振り返ってみると、実に興味深い知見が得られる。我々は物理学の専門家として、科学普及を試みる一環として行ってきた「親子理科実験教室」であったが、実は、我々自身が、科学的認識のさらに進んだ段階へと導かれたのではないだろうか。基礎科学分野のプロとしてこれまで、大学教育において、その理解を深めようと様々な工夫をしてきたとはいえ、それはまだ、本当に「見える」ということ、生き生きとした自然の姿を体感するという意味では不十分な認識しか、学生たちに与えてこなかったのではなかろうか。

以下、ここで取り上げた「電磁気」というテーマに絞って、より具体的に説明してみよう。電磁気学は実に複雑で分かりにくく、例えば、小学校や中学校、高校で学ぶフレミングの右手や左手の法則は、単に「答えを出すための」現象論的な手順を与えてくれるだけで、その本質に迫ってくれない。ニュートン以来確立された力学のように、すっきりしていないし、式も複雑であって、後味の悪いテーマである。とはいえ、力学ですら、大学に入学して「 $f=ma$ 」という式を見て感動しないのは、その意味が本当には分かっていないからだ」と大学の授業で言われて、初めて、ガリレオやニュートンの偉大さに感激し、「加速度」という概念が基本的であるという、偉大な発見をした先達に思いを馳せたものである。電磁気に至っては、大学の専門基礎教育での授業ですら、まだその本質には思っていたらぬ。専門課程に入って、マクスウェルの見事な統一され、洗練された式をみて、初めて「やっと美しくなった」とその統一的な記述に感激するという人も多いのではないだろうか。そして、「初めからこういうことだと指摘してくれたらすっきりしたのに」といいたくなるのである。尤も、マクスウェルの式を理解するには、ベクトル解析、それも3次元でなく4次元へ拡張した数学の展開を扱えるだけの訓練がなければ、使いこなすことは無理であり、やはり、訓練時期が必要になる。それが大学の専門基礎教育での訓練なのかもしれない。随分と遠い道のりである。

電気磁気現象にじかに触れ、エルステッドからファラディ、マクスウェルにいたる先人たちの発見の歴史をたどると、初めから美しい式にたどりついたのではないし、電磁気現象を駆使して得られたおびただしいハイテク機器にいたる多くの発見においては、さらに具体的に、電磁気現象が「見える」という経験をしてきたのではないだろうか。むしろ、マクスウェルの天才的ともいえる電磁気の統一の仕事は、単なる式の美しさ以上に、そこから電磁波の存在や「場」の実体的把握につながる深い意味を有している。しかし、後に学ぶ学生たちに対して、その美しさだけを伝えても、それは、自然の持つ豊かさの半分も伝え切れていないのではなかろうか。

大学教育においては、この2つの側面を、車の両輪のごとくバランスよく伝えることによってこそ、電磁気学の持つその奥深さと豊かさを伝えることができる。自分たちの認識がたどってきた経路を振り返って、より豊かな経験を次代の若者が享受するためには、「可視化」や「擬人化体験」によって自然現象の仕組みが「見える」創造的な環境こそが必要なのではないか。初等中等教育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にもかかわらず、「中学・高校で先生が多くの興味深い実験をしてくれて理科に興味を持ったので理系に進学したが、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」と言う学生がいる。良い意味でも悪い意味でも初等中等教育で育かれたものを、大学教育はその初期の段階からしっかり受け止め、「可視化」や「擬人化体験」によって自然現象の仕組みが「見える」という経験をその教育の中に位置づける必要があると提言したい。科学技術が発達した現在、大学全入時代をむかえ、大学教育における科学教育は、全ての学生に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。

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一京都大学理学研究科長、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。また、まめ磁石模型の議論にお付き合いいただき、佐伯胖氏の著書をご紹介いただいた松下佳代教授のご指摘は大変参考になりました。この取り組みの中心テーマ、電磁気学の議論をリードいただいた松田卓也先生にも、感謝いたします。また、改めて、議論の労を惜しまず、ご支援いただいた小山田耕二教授と研究室の皆様感謝いたします。

註

- 1) 川村康文考案：平成16年8月7日（土）～8日（日）および平成19年3月17日（土）に実施、ガリレオ工房の例会で紹介。「体感の理科教育」の実践として、学習者に学習内容を理解してもらいやすくするにはどうすればよいか、工夫したもの。

引用・参考文献

坂東昌子 1992 「文系に物理を教える」『日本物理学会誌』47巻3号、234-236頁。

坂東昌子 2010 「南部モード」『数理科学』48巻9号、54-61頁。

Maxwell, J. C. 1904 *A Treatise on Electricity and Magnetism*. OXFORD AT THE CLARENDON PRESS.

佐伯胖 1995 「「学ぶ」ということの意味」岩波書店。

山下芳樹・石尾広武・上田倫也・坂東昌子・川村康文・前直弘 2010 「自然現象の可視化—親子理科実験教室から学ぶ」投稿予定。