

前提・矛盾・再構成過程を用いた授業開発

櫻井勇良*

Development of a class to highlight the premise-contradiction- reconstitution reasoning process

Yuryo Sakurai

Abstract:

In this study, a class was developed to introduce students to a reasoning process that employs the formation of a premise, encountering a contradiction to that premise, and reconstitution of their knowledge after processing that contradiction. The study included the development of experiment teaching materials, preparing experimental activities, and recording observations of student performance of the activities. The teaching materials were designed to challenge learners' commonly-held notions, thereby setting up contradictions for the learners to process. Students were presented with three situations which appeared to contradict their common sense, involving the following phenomena: 1) like poles of a magnet repel each other; 2) an iron ball is attracted to a magnet; and 3) water does not immediately evaporate at room temperature. Using the experimental equipment produced in the class, students were able to resolve these contradictions, employing the process of premise, contradiction, and knowledge reconstruction.

KEY WORDS: Premise, contradiction, reconstitution, teaching materials

要旨:

本研究では、前提・矛盾・再構成という過程を用いた授業を実践した。1) 題材の探索、2) 実験教材の開発、3) 実験結果の収録などの準備を行った。学習者の内面にどのような矛盾を創り出すかということに着目した教材の開発を試みた。以下の常識を前提とした。1) 同極の磁石は反発する、2) 鉄玉は磁石に吸着する、3) 水滴は常温ではすぐにはなくなる。試行錯誤の結果、これらの常識を覆す実験装置を実現させることができた。また、実験装置を用いた授業を行った結果、前提・矛盾・再構成過程を用いた授業が展開できた。

キーワード: 前提、矛盾、再構成、実験教材

1. 問題と目的

1.1 経緯

筆者は、大学において主に2年次生の学生を対象とする電磁気学を担当している。電磁気学に対して、難解であるという印象を持つ学生が多くいる（筆者も学生であった時はそうであった）。そのような印象を和らげるものとして実験が有効である。一般的に、

面白い教材には迫力があり、学習者に強烈なインパクトをあたえ、興味・関心を高めるといわれている¹⁾。しかし、これはあくまでも一般論であり、その内容や実施の仕方によっては逆効果になる場合も考えられるので注意が必要である。

人間が知識を獲得する場合、必ず認知過程と経る。そのことから考えれば、教育行為を扱う場合、認知過程を踏まえるのは当然のことである。筆者は、このことに気づくまでは、経験則に依存した手法で対

*湘南工科大学 工学部 電気電子工学科
准教授

応していた。認知過程の存在を知ってから、それに関する知見を活用するようにしている。本研究は、その一環で実施したものである。

筆者は、実験の位置づけやその効果については、日々検討を行っている。実施後は必ずチェックを行っている。これまでは、どちらかといえば、事象の再現を目的として実験を行ってきた。これに関する経験を増やす過程で、事象の再現に留まらず、学習者の思考過程に関与する必要性を感じるようになってきた。

そこで、それらに関係する図書、学術雑誌などを用いて調査研究を行った。その結果、事象を観察した時、学習者に感動を与えるすなわち認知過程で良く知られている認知的不調和²⁾を誘発させることに強い関心を持つようになった。

その後、認知的不調和の3つの要素(驚き、当惑、協調欠如)に関する理解と認識を深めるための学習を行いながら改善への具体的な導入について検討した。これらの3つの要素(驚き、当惑、協調欠如)についてその意味を調べた結果、一見、異なるような印象を持つが、互いに関連していることに気づいた。つまり、表現の違いはあるものの、協調欠如により当惑が発生し、その当惑は驚きを誘発させるというように、独立したものではなく、同時発生する認知であると解釈を得た。また、3つの要素がどのような場面で発生するかを突き詰めたところ、「学習者がある場面に遭遇した時、その状況を説明・理解ができない、という状態に陥ったことを自覚したときである」という結論を得た。別の言い方をすれば、理解(論理)が混乱した状態になった時に発生する認知であるといえる。学習者がこのような事態になった場合、何もしないすなわち思考・理解活動が停止する者と、何らかの対応をする、すなわち理解活動を持続させる者に大別できる。一般には、後者の活動を期待して、認知的不調和が教授方略の一つとして用いられている。

次に、どのような場面に学習者を遭遇させて、認知的不調和を自覚させるかについて、これまでの経験を踏まえながら検討した。その結果、矛盾という要素³⁻⁶⁾やそれを核とした前提・矛盾・再構成という要素⁷⁾を使った授業があることに強い興味を持つようになった。これを踏まえて、授業展開のイメージ作りを考えた。その結果、前提・矛盾・再構成という要素を取り入れた授業を展開したいと強く思うようになった。ここまでは、本研究の経緯である。

前提とは、学習者があらかじめ持っている考え・知識である(いわゆる常識)。それとは異なる事実を示すことで学習者は矛盾を感じる。そして、その矛

盾を解消するために理解活動を行い、矛盾を解消するすなわち説明・理解ができるようになる。その結果、矛盾に出会う前まで持っていた考え・知識が再構成され、新たな考え・知識を内面化するというものである。これを認知的不調和の要素で言えば、矛盾は葛藤と類似している。そして、どちらも、その誘発をきっかけにして学習を持続させるという点で一致している。これらを比べると、表現の違いはあるものの、目指していることは同じであるといえる。

認知的不調和という表現を用いても良いが、前提・矛盾・再構成という表現の方がわかりやすいとの判断から、こちらの表現を用いることにした。本稿では、前提・矛盾・再構成という学習過程を学生に誘発させるために、試行した実験や実験器の内容およびそれらを使って行った運用例などについて概要を報告する。

1.2 各実験の前提・矛盾・再構成について

次に、具体的な題材について述べる。前提・矛盾・再構成という過程を用いた授業に適するものを筆者がこれまで行ってきた実験の中から選定した。その結果、3種類の実験をピックアップすることができた。

1つは、水滴と静電気を使った実験であり、残りの2つは、磁石を使った実験である。水滴と静電気を使った実験の場合、前提になるのは「水滴は、常温の場合は時間が経つにつれて徐々に蒸発して無くなる。熱を加えればその時間が短くなる」という常識である。この前提と「熱を加えなくとも、静電気を使えば短時間でなくなる場合がある」という事実によって矛盾が発生する。そして、水滴が静電気によって消える理由を理解することで知識の再構築が行われ、水滴がレイリー分裂^{8,9)}を起こすためであるという新たな知識が内面化することが期待できる。

同極の磁石を向い合せた時に発生する力(引力・斥力)を扱った実験において、前提になるのは、「同極を近づけた場合、斥力が発生する」という常識である。この前提と「同極の磁石を近接させた場合、使用した磁石の磁束密度の大きさが同等の場合は、常識通り接触させるまで近づけても反発力しか発生しない。しかし、磁石の磁束密度の差がある値以上(約5倍以上)になると、磁石間に生成する力の種類が接近させる距離によって異なる場合がある」という事実によって矛盾が発生する。そして、その理由を理解することで、知識の再構築が行われ、磁石間の斥力は、同極で起きるという表現は、正しくなく、用いられる磁石の磁束密度の大きさの差が比較的小さい場合に限るといった新たな知識が内面化することが期待できる。

磁石と鉄玉を使った実験において、前提となるのは、「鉄玉は磁石に吸着する」という常識である。この前提と「狭いプラスチックケース内に閉じ込めた鉄玉に磁石を近づけると磁化された鉄玉が並列に並ぶことにより、斥力が発生し、その力と磁石からの引力、重力などのバランスによって磁石に吸着せず、浮揚する場合がある」という事実によって矛盾が発生する。そして、その理由を理解することで知識の再構築が行われ、磁石間の斥力は、同極で起きるという表現は、正しくなく、用いられる磁石の磁束密度の大きさの差が比較的小さい場合に限るという新たな知識が内面化することが期待できる。

1.3 本研究の概要

本研究では、実験を用いた前提・矛盾・再構成を活用した授業を開発することを目指し、上記の3種類の実験を用いた授業展開を試みる。実験器の試作および授業の展開は筆者自身で行う。授業後に学生と意見交換を通して、実験器を含めた授業全般についての改善点を見つけ出し、授業改善に役立てる。評価を行う場合、アンケートが用いられるが、筆者は、一方通行ではなく、学生とのやり取りを通して問題点のピックアップや改善へのヒントを得たいという考えから、それが困難であると考えられるアンケートを用いずに、対話を通しての方法を用いた。対話が絶対的に良い方とは言えないが、アンケートに比べれば、学生の反応がより直接的に得られると判断したのでそのような方法を用いた。

指導要領の内容¹⁰⁻¹⁸⁾を見ると、本研究で扱った実験は、小学校第3学年で学ぶ磁石の性質、小学校第4学年で学ぶ水および中学校第2学年で学ぶ静電気に関する単元でも活用できるので実施する意義があるといえる。

2. 授業の展開例

以下で示す3種類の実験を使った授業は、全て筆者が担当している電磁気学で展開した。

2.1 実験 1（同極間の磁化現象）

2.1.1 諸言

磁石の同極を近づけた時に斥力が生成することは、常識として知られている。しかし、筆者は、磁石の条件を変えながらこの実験を行った結果、条件によっては、斥力から引力に力が変化する場合があることを確認した。そこで、この事象の使い道について検討したところ、上記した矛盾を誘発させるための実験の一つとして使えそうであると考えた。この事象は、磁石を素手で持ち、同磁極を近接させること

で体感することができるが、グラフを使って説明できるようにしたいと考え、そのための測定を行うことにした。測定したのは、磁石間に生成する力の種類（斥力・引力）とその大きさおよび磁極面近傍の磁束密度分布である。

2.1.2 装置の試作

上記の測定を行うために装置を試作することにした。ポイントは、磁石やセンサを移動させることと移動した距離を電気信号に変えることである。

試行錯誤した結果、自動 X-Y ステージ（以下ステージと略す）や光学部品を用いて構成できることがわかったので、それを実現することにした。

ステージを動かす速度や水平方向の位置は、コンローラにより手動で行う。垂直方向の位置は、ヘリコイドスタンドを用いて行う。磁石は、ステージの固定部分と稼動部に取り付け、ステージを動かすことで両者間の距離を調整する。ステージが動いた距離を電気信号として収録するために、摺動抵抗器（直線型、移動距離（100 mm）と抵抗値（10 K Ω ）の関係が線形）とデジタル式ノギス（ ~ 150 mm、誤差 ± 0.03 mm）を用いる。磁石間に発生する力は力センサ（ナリカ、E31-6990-16、 $-50 \sim 50$ N、精度 0.1 N）で測定する。

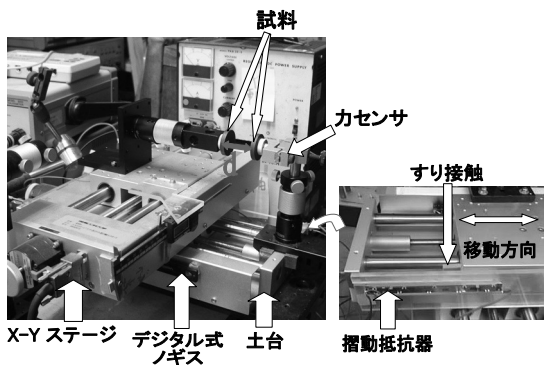


図1 実験装置の概観図

図1に試作した測定装置の概観図を示す。摺動抵抗器およびデジタル式ノギス（ ~ 150 mm、誤差 ± 0.03 mm、以下ノギスと略す）の本体は、ステージの固定部分に設置し、摺道抵抗のすり接触部分およびノギスの可動部をステージの稼動部分に固定させた。摺動抵抗器に電圧を印加しておけば、ステージが動いた長さを電圧変化として記録できる。そして、電圧センサ（ナリカ、 $-20 \sim 20$ V、分解能 10 mV）で測定した値とノギスで測定した数値を用いて磁石間距離

に換算することができる。これを横軸にすれば、磁石間距離 d (mm) と力 F (N) の関係を表わすことができる。

2.1.3 結果

(1) 磁石間距離と力の関係

表 1 に示す市販の磁石を全て組み合わせで測定した。その結果、磁石間距離を減少させたときの磁石間に発生する力が、斥力のみの場合 (図 2, 試料 M1 同士) と引力が混在する場合 (図 3, 試料 M1 と試料 M3) があることがわかった。これらの変化は、磁石の組み合わせ方に依存する傾向が見られた。その結果を表 2 に示す。表中では、斥力のみ場合を×印 (符号変化なし) で、引力が混在した場合を○印 (符号変化有り) で示してある。

表 2 の結果を見ると、いずれの試料でも、同じ試料を組み合わせ用いた場合は、磁束密度の大きさに関係なく、斥力のみが働いていた。しかし、試料 M1 と他の試料を組み合わせた時に、引力が混在する場合があった。そこで、その違いを検討した結果、用いた磁石間の磁束密度の高さの違い、すなわち磁束密度の比に依存するのではないかと考えた。そこで、磁束密度の比 (表中の () の中の数字) を求めた結果、引力が混在する場合 (4.70~8.30) と斥力のみ場合 (1.00~1.79) とで差があるのがわかった。

表 1 使用した磁石

試料名	大きさ(mm)	磁束密度 B (mT)	
M1	Φ29.5×5	60	Ferrite
M2	Φ10.0×10	320	Fe-Nd-B
M3	Φ20.0×5	280	Fe-Nd-B
M4	Φ30.0×15	500	Fe-Nd-B

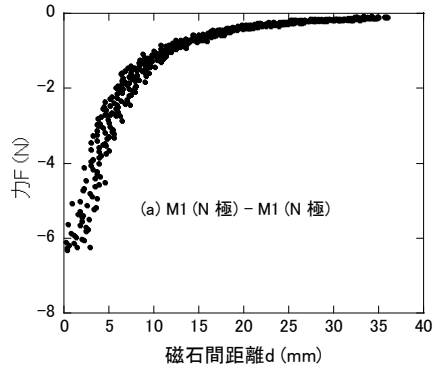
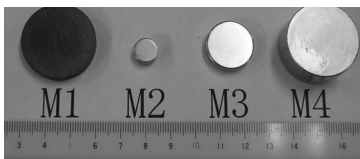


図 2 試料 M1 を使った実測例

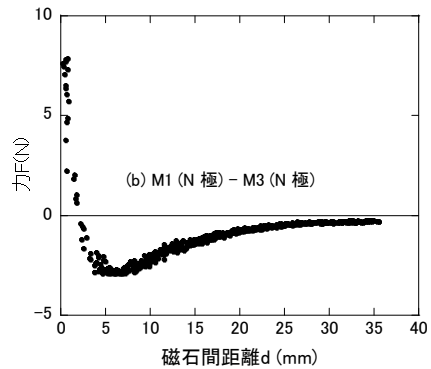


図 3 測定例

表 2 力の符号変化の有無

試料	M1	M2	M3	M4
M1	× (1.00)	○ (5.30)	○ (4.70)	○ (8.30)
M2		× (1.00)	× (1.10)	× (1.56)
M3			× (1.00)	× (1.79)
M4				× (1.00)

()内の数字は磁束密度比
○：有. ×：なし

(2) 引力が混在した磁石の磁束密度分布特性

磁石間の力は、磁気モーメントの向きによって決まり、対抗すれば反発、同方向なら吸引となる。図3のように途中で力が反発から吸引に変わったのは、磁気モーメントの向きが変わったことを意味する。それを確かめるために、実験の前と後における磁石の端面上の磁束密度分布を測定した。測定は上記のステージと磁束計を用いて行った。センサ端面は、試料の端面に垂直に配置した。

図4に、試料M1と試料M3を組み合わせた時の試料M1の測定結果を示す。縦軸の正の符号は、N極を示し、負の符号はS極を示す。図に示すように、実験後の試料M1において、試料M3と向かい合った部分に、極性の反転が現れるのがわかる（図5）。

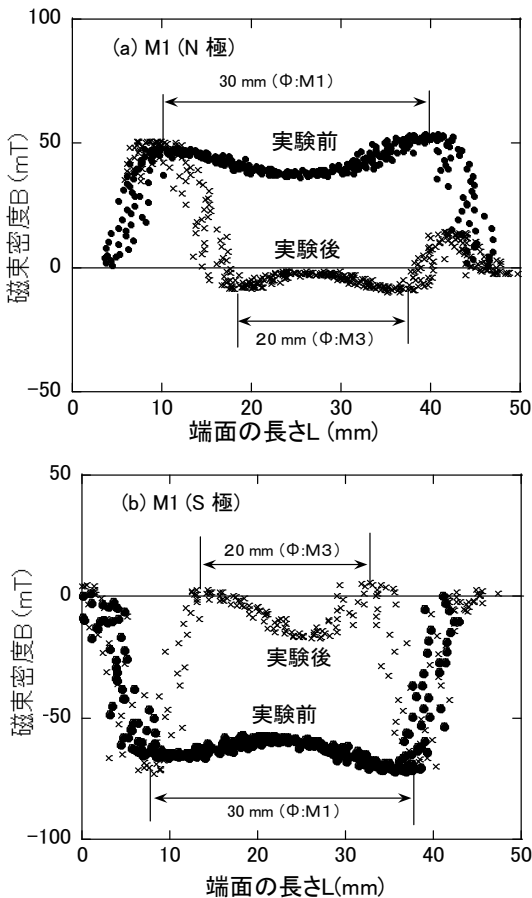


図4 実験前と実験後の試料の磁束密度分布特性

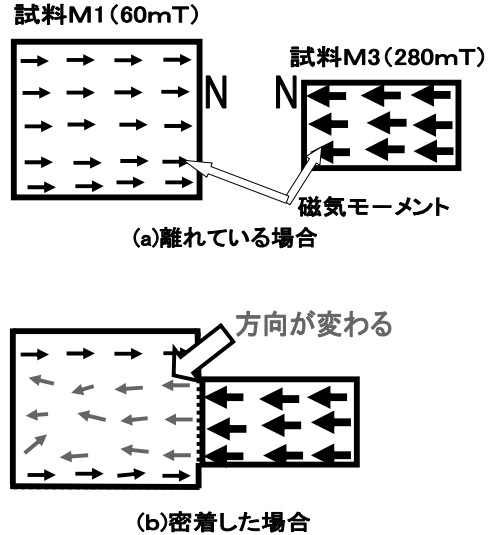


図5 イメージ図

2.1.4 授業実施例

以下では、筆者が授業で行った実施例について概要を述べる。

まず、「同極を近づけた場合、斥力が発生する」という実験を見せる。この実験は、当たり前的事象を確認するとともにその意識を集中させるために行うものである。この集中させることがポイントになる。口頭で説明することもできるが、それよりは、実際に見せた方が集中させる効果が高いであろうとの判断から、あえて磁石を用いて見せることにしている。

次に、矛盾を誘発させるための実験を演示する。演示する実験は、2種類ある。1つは、同程度の磁束密度を持つ磁石を用いたものである。この場合は、前提の内容を検証する結果となる。しかし、その後で見せる実験では、磁束密度の差が3倍程度異なる磁石を用いるために互いに吸着した状態で終わる。これが、矛盾を誘発させるのである。1回だけでは、信じられない者もいるので、繰り返し見せる。それでも信じられない者がいるような場合は、「やってみよう人は手を挙げてください」と言って希望者に磁石を渡して、実際に体験してもらう。ここまで行くと、ほとんどの学生は、前提と異なる事象が存在することを認めるようになる。

これ以降は、理由を理解し、知識を再構成するための作業を行う。直ぐに答えを説明することは行わず、作業を行いながら、結論まで導くことを行う。

始めに行う作業は、「何故、同極は反発する、異極は吸着するのかを磁力線の模様を使って説明せよ」という発問に対する回答作業をさせる。状況を見て、しばらくした後、磁力線の模様が何故そうなるのかを理解させるために説明を行う。この時点で、作業が途中の者もいるが、気にしないで進めている。その理由は、この説明の後に、設けてある認知的余裕としての時間を利用して作業を進めることができるからである。もし、聞き逃したとして、友人から聞くあるいは筆者への質問で補えるようにしてある。

その次に、磁気モーメントの話を行い、磁石の中に磁気モーメントを描かせる。そして、磁気モーメントの性質や磁力の大きさと磁化の話をする。この話の中に、回答の一部が含まれている。ここまで説明を行った後、「ここまでの説明を聞いて、2つの実験の違いが分かった者はいるか」と問い、該当者がいたら、説明を促し、その内容をチェックし、結論まで話を進める。もし、該当者がいなかったら、結論までの話、すなわち「磁気モーメントの向きが重要であり、それが変わったために本来は、斥力が作用し続けなければならないのに途中から引力に変わってしまった。そのカギを握るのが磁束密度の差である」という結論で終わる。

最後に、磁束密度の差を変えたらどうなるかについて、既の実験した実験結果を使って、実験結果の開示と説明を行う。これは、先に説明したことが想像話ではなく、事実に基づくものであることを実感させるのに有効である。この事実の開示がない場合、結論が想像話として受け止められ、知識の再構成ができないあるいは出来ても弱くなる恐れがある。したがって、この実験結果は重要になる。この実験に限らず、実験を実験で検証するいわゆる実験弁証法は、事実を事実として認識させる方法として有効であるといえる。

以上のように、2つの磁石の磁束密度の差を変えた場合の両者に発生する力の性質を調べた実験やそれに関する説明を通して、最低でも、1)「磁石間の斥力は、同極で起きるという表現は、正しくなく、用いられる磁石の磁束密度の大きさの差が比較的小さい場合に限る、2) 近づける磁石間の磁束密度の違いがある値以上(約5倍以上)になると、磁石間に生成する力の種類が変わる、3) 磁石の磁極は、単なる場所を指す名称ではなく、そこには磁気モーメントが存在しており、その向きやその数が磁性を決定している、4) 磁気モーメントは、外部条件により変わる場合がある、などの知識が内面化されることを期待している。実際には、個人差があるので内面化したものを把握することは困難である。

この後に、学生と意見交換を通して、実験器を含めたに授業全般についての改善点を見つけ出す作業を行う。学生の指摘内容に不明な点があれば質問を行い、指摘内容を明確にする。この意見交換は、授業への評価よりも、どこをどのように改善すれば良いかということへの有用な情報を得るのが目的なので、意味不明な指摘のまま聞き流すわけには行かず、内容が明らかになるまで学生への質問を繰り返した(意地悪ではない)。質問を繰り返すことは、筆者にとって有用であるばかりではなく、学生が自分自身の質問の内容を吟味する機会にもなるという考えから、あえて行うようにしている。

以上が運用の一例である。運用は、その時の学生の状態や授業の進行状況により変わる場合がある。例えば、磁化の話においては、棒磁石とドーナツ型の磁石を2つに割り、割った面を接近させることを行う。そして、棒磁石の場合は、引力が作用するのでつながるが、ドーナツ型の磁石は、斥力が働くためにつながらないという事象を用いる場合がある。

2.1.5 結言

二つの磁石を使って、前提・矛盾・再構成を用いた授業展開を試行した。「同極の磁石を近接させた場合、使用した磁石の磁束密度の大きさが同等の場合は、常識通り接触させるまで近づけても反発力しか発生しない。しかし、磁石の磁束密度の差がある値以上(約5倍以上)になると、磁石間に生成する力の種類が接近させる距離によって異なる場合がある」という事実を矛盾の核とした授業を展開した。その結果、得られた実験結果の有効性を確かめることができた。

2.2 実験 2 (永久磁石で鉄玉を浮揚させる)

2.2.1 諸言

筆者は、2003年12月25日の夕刊で、永久磁石によって鉄玉が浮遊する現象の存在を知った。夕刊に掲載されていた写真を見た瞬間、「これは面白い、明日、大学に行って早速再現してみよう」と思ったと同時に「浮揚している鉄玉は無接触なのか」、「どうして磁石に吸着する鉄球が浮揚するのか」などの疑問を持った。これに関する論文は次の年の2月に掲載された¹⁹⁾。

鉄玉が磁石に吸着するのが常識であるという考えからすると、この事象は、それを覆いしており、上記した矛盾を誘発させるための実験の一つとして使えるのではないかと考えた。そこで、前述した論文を参考にして、再現実験を行うと共に装置の改善・簡素化を試みた。

2.2.2 装置の試作結果

(1) 当ての無い実験からの脱出

文献 19 では、どのような手順で鉄玉を浮揚させたかについて、具体的な記述がなされなかった。そこで、同じような部品を用いて検証を行うことにした。

最初に試作した装置の外観を図 6 に示す。この現象は、磁石と鉄玉の位置関係が重要であり、磁石の位置を上下左右に変えられるようにした方が良さだろうとの判断から、ヘリコイドロッドスタンドを用いることにした。試行錯誤した結果、以下のような方法で行えば、鉄玉を安定に浮揚させることができるようになった。

始めに、2 枚重ねた磁石の真下に鉄玉入りのプラスチックケース（以下ケースと略す）を配置する。上から、および正面から眺めて互いの中心線がほぼ一致するようにする。ケースの下部のところにガードを取り付け位置関係が保てるようにする。

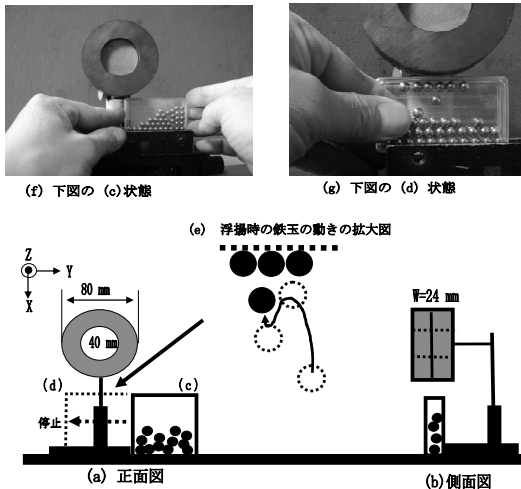


図 6 1 号器による鉄玉浮揚例

以下では、主な工夫の内容を述べる。互いに静止した状態のままでは、ケース内の下部にある鉄玉と磁石は離れているので何も起きない。鉄玉を浮揚させるには、磁石に近づける必要があり、そのためには、何らかの方法により、ケース内の鉄玉に運動を与えなければならない。

そこで、ケースに瞬間的な水平運動と与えることを考え、試行した。その結果、両手を使ってケースに運動を与える方法により、鉄玉を磁石に近づける

ことができることがわかった。右手の指でケースの右側をつまみ、磁石のほぼ真下を通過させる。ケースの中心線と磁石の中心線とがほぼ一致するところまで移動させたところで、ケースの左側が左手の手のひらにぶつかるようにする（図 6）。つまり、移動させたケースを左手にぶつけることでケース内の鉄玉は、惰性之力で上方に飛び跳ねるようになる。この動きを利用して鉄玉を磁石に近づけた。ケースを動かす早さや左手の位置は、鉄玉の飛び跳ねる状態を見ながら調整する。

この方法は、偶然に支配された方法なので根気が必要である。毎日“ガチャガチャ”音を鳴らしながら、鉄玉の入ったケースを動かす動作を辛抱強く繰り返した。最初に鉄玉の浮揚状態を観測したのは、実験を始めてから約 1 ヶ月後である。その時は感動を覚えた。その後、何回か浮揚状態を実現することができるようになった。また、鉄玉が浮揚する時の状況を意識しながら実験を続けた結果、浮揚する場合の鉄玉の動きは、ケースの底から上方に向かって、きれいな放物線を描くことがわかった。さらに、きれいな放物線を描いた鉄玉は、一旦、空中で小さな上下運動を行ってから安定になることがわかった。この運動を見た瞬間、磁石の下部に鉄球が浮揚できる領域が存在することを直感した。そして、もしそうならば、その場所付近に鉄玉を移動させれば、容易に浮揚させることができるかもしれないと考えた。

そこで、今まで行ってきたような確率に頼る方法ではなく、制御可能な部分を取り入れた装置を作ることにした。ポイントは、磁石とケースの位置関係を詳細に可変できることであるのでそのことに注視しながら装置の試作を行うことにした。これをきっかけにして、装置の開発を行うようになった。以下では、それらの概要について述べる。

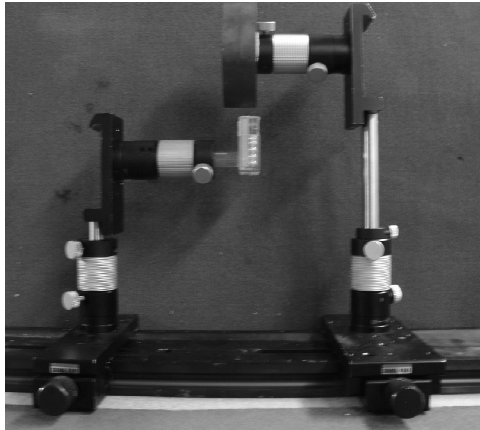
(2) 磁石とケースを前後左右に動かすことができる装置の試作

試作した装置の外観を図 7 に示す。図 6 と異なるのは、ケースの位置が前後左右に動かすことができることである。この装置を使った方法の概要を以下に述べる。

磁石とケースの位置関係は、図 6 と同様に上からおおよび正面から眺めて互いの中心線がほぼ一致するようにする。違うのはここからである。

まず、ケースと磁石を密着させる。次に、ケースを少しずつ下方に移動させる。この移動によって変わるのは、2 列目以降の鉄玉である。ケースと磁石との距離を少しずつ長くする（鉄玉に及ぶ磁石の影響を弱める）と鉄玉の落下が起きる。磁石から離れた

所に存在している鉄玉から先に落ち始める．そして，2 列目の鉄玉が 1 個あるいは数個残るまでこの動作を続ける．2 列目に残る鉄玉の数は，鉄玉の重量と磁石の磁束密度の大きさに依存する（重量が軽くなるにつれて数は増える）．



(a) 外観写真 (側面)

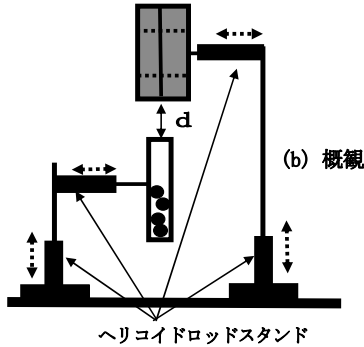
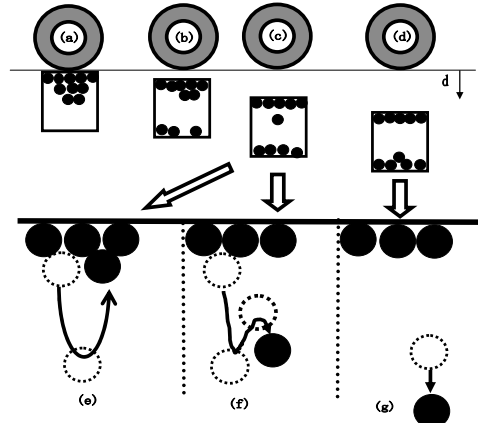
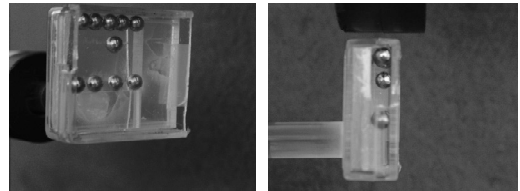


図 7 2 号器の概観

ここからが鉄玉浮揚現象の始まりである．引き続き，少しずつ断続的にケースを下方に移動させ，磁石との距離を長くすると，2 列目の鉄玉が一旦落下してから上方に少し動き，安定に浮揚ようになる（図 8）．鉄球の落下が始まっても，ケースの移動を止めずにそのまま移動させると，鉄玉は落下するだけで浮揚しない．したがって，2 列目の鉄玉の落下運動が現れるまでゆっくり移動させ，その動きが現れた瞬間にケースの移動を止めることが操作のポイントである．熟練すれば，鉄玉が落下する直前の様子がわかるようになる．



上図 (c) の前後の鉄玉の動きの拡大図



(h) 上図の (c) 状態

図 8 2 号器による鉄玉浮揚例

以上のように，この装置を使うことにより，図 6 で偶然観測した浮揚に関する断片的な現象が，一連の動きとして観察することができるようになった．もちろん，時間的にも大きな節約になった．この装置を使った場合，1 分以内で浮揚現象を再現できるようになる．確率に頼った図 6 の場合とは大違いである．

ここで終わりにしても良いと思ったが，更なる工夫を考えた．その理由は，この現象は面白いので，小・中学生にも体験させてやりたいと思ったからである．そこで，小・中学生が操作することを踏まえ，装置を改善することにした．ポイントは，手軽に実験ができるようにすることである．

(3) 小・中学生でも簡単に鉄玉を浮揚させること
できる装置の具現化 (装置の簡素化・軽量化
および操作の簡素化)

小・中学生が図 7 で試作した装置を使って鉄玉を浮揚させる場合，多くの問題点があると考えられる．本稿で述べた操作方法の中には，言葉で表現し難い

操作方法（コツ）が含まれる。したがって、そのことを伝えるために手間がかかる。そこで、これらのことを解消し、かつ、以下の3つの改善を実現して小・中学生でも簡単に鉄玉を浮揚させることができる装置の具現化を試みることにした。

- 1) 単純で軽量化装置にする。
- 2) 鉄玉を浮揚させる操作時間をさらに短くする。
- 3) 事故防止のために磁束密度の低い磁石を使う。

まず、断片的な予備実験を行い、部品の選定を行う。小型で低磁束密度のフェライト磁石を数種類用意する。鉄玉については、浮揚させるのに必要最小限の状態を調べる。また、それに伴い、ケースの軽量化も図る。

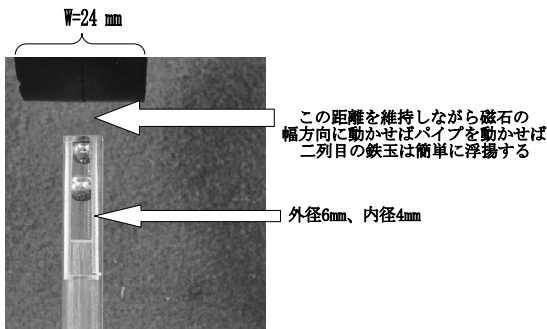


図9 3号器による鉄玉浮揚例

手持ちの鉄玉の中から小さめのものを選び、四角形あるいはパイプを用いたケースに入れて試行錯誤した。浮揚した条件の中で最軽量・最小の大きさのものは、直径3.95 mm（重さ0.279 g）の2個の鉄玉を外径6 mm、内径4 mmのパイプに納めた状態であった。これにより、鉄玉を入れる部分の小型化と軽量化が実現した。

最も重要な動作である磁石とパイプの位置の調整については、他の部品を使わずに両手だけを使って調整することを試みた結果、簡単に浮揚させることができた（図9）。ポイントは、1号器や2号器と同じく、1列目の鉄玉と磁石との距離である。この距離は、条件により変わるので、その都度捜さなければならない。3号器について捜した結果、図9に示すような位置関係において、容易に浮揚することがわかった。この距離さえ覚えておけば、浮揚現象が簡単に再現することができるようになる。

以上のように、3号器の鉄玉を入れる部分は、1号器・2号器に比べて、確かに小型化・軽量化すること

ができたが、磁石の部分がそのままなので改善の余地がある。

そこで、この部分の改善も試みた。軽い鉄玉を用いれば磁石の磁力も小さくて済むだろうとの考えから、弱い磁力の磁石による浮揚実験を試みた。その結果、図10に示すように外径45 mm、内径19.5 mmのリング型の磁石を約半分割ったものを2枚重ねて用いれば浮揚させることができることがわかった。もちろん、浮揚する直前における鉄玉の瞬間的な下降・上昇運動も観測できる。このような工夫を行った結果、この4号器の重量は約50 gとなり、1号器の総重量（約4.5 kg）に比べて約1/100の重さまで軽量化することができた。

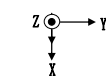
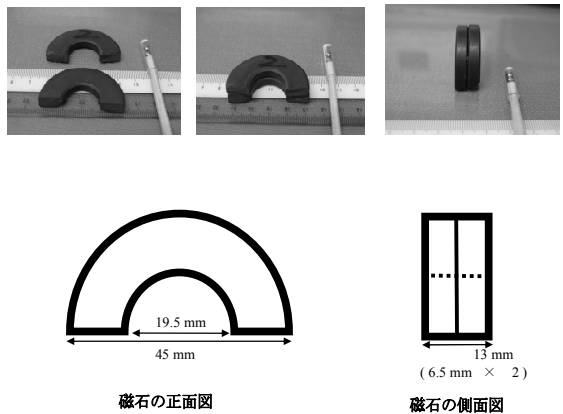


図10 4号器の概要

4号器の場合の鉄玉を納める部分は、3号器とほとんど同じである。異なるのは、パイプの上下に磁石と鉄玉の距離を調整するための、木製の部品をつけたことである。まず、パイプの上部にある木片を少しずつ変化させながら浮揚作業を行う。1列目の鉄玉は、上部の木片に接触しているため、観察の対象にはならない。観察の対象は、2列目の鉄玉である。何回か繰り返す過程で、浮揚する直前に見られる運動、すなわち鉄玉の瞬間的な下降・上昇運動が観測できるようになる。この動きが観測できれば、条件が適正範囲に近づいたことを意味するので、これ以後の作業は、少し丁寧に行う。

次に、下部に挿入した内径と同等の太さの木製の棒の差し込みの深さを変えて浮揚作業を行う。2列目

の鉄玉と磁石との距離を調整することにより、浮揚と非浮揚の繰り返し観測ができるようになる。

このような調整を行えば、図 11 に示すように、内径の中央付近を、厚さ方向に透明なパイプを動かすだけで、簡単に浮揚と非浮揚の現象を再現できるようになる。位置関係さえ覚えれば、誰でも簡単に何回でも浮揚現象を再現できるようになる。もちろん、浮揚する直前における鉄玉の瞬間的な下降・上昇運動も観測できる。

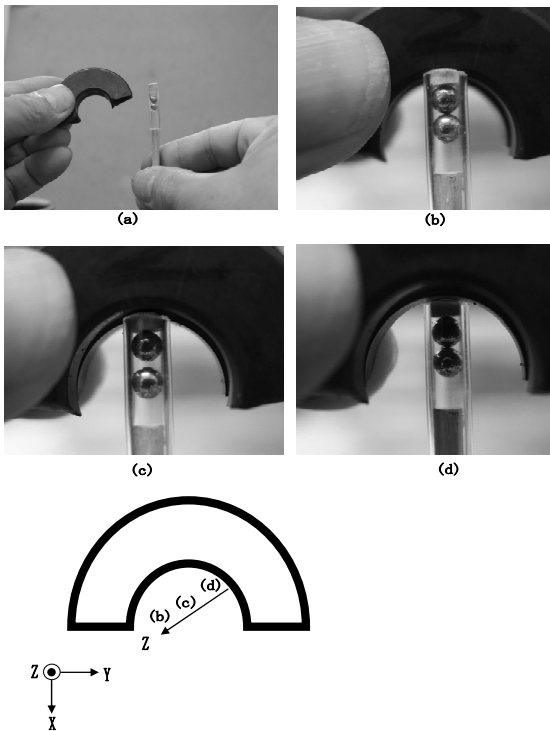


図 11 4号器による鉄玉浮揚例

最後に、筆者がこの現象の写真を初めて見たときに抱いた「浮揚している鉄玉は無接触なのか」という疑問に対する検討結果について述べる。

試作した装置を用い、鉄玉と磁石の位置関係を詳細に変化させながら観察した結果、ケースの上下左右の四方向のうち、上下方向では無接触状態、左右方向のどちらかに必ず接触するという状態で浮揚することが確認できた。つまり、三次元において無接触で鉄玉は浮揚していないことが明らかになった²⁰⁾。

この結果は、この現象に深く関わっているアンショウの定理²¹⁾から考えると次のように説明できる。

この定理は、重力場、電場、磁場において静止物体を安定に浮上させることは、不可能であることを示すものである。安定というのは、三次元方向のすべてにおいて、ポテンシャルの最低点が存在する、すなわちある位置にとどまることができるということである。この定理では、それを否定しており、三次元方向のすべてにおいて、ポテンシャルの最低点が存在するわけではないので、ある位置にとどまることができない、ということを示している。したがって、浮揚した鉄玉が、ケースの上下左右の四方向のうち、左右方向のどちらかに必ず接触しながら浮揚したのは、接触していた左右方向において、ポテンシャルの最低点が存在していなかったことを意味する。その方向には、逆に不安定な状態となるポテンシャルの最高点が存在していたと考えられる。そのために、左右どちらかの方向に移動せざるを得なくなり、ケースに接触したものと考えられる。

以上のことより、鉄玉浮揚現象を紹介した新聞の記事において、アンショウの定理を覆している（無接触で浮揚している）可能性があるかのような記述があつが、筆者が体験した範囲では、この鉄玉浮揚現象は、アンショウの定理に従った現象であることがわかった（もう少し丁寧に実験を行えば、大騒ぎになる事象ではなかったといえる）。この現象は、磁石によって磁化された 1 列目の鉄玉と 2 列目の鉄玉の間に生成する斥力・引力および重力の相互作用により復元力が生成したために起きたものであると考えられる。

2.2.3 授業実施例

以下では、筆者が授業で行った実施例について概要を述べる。

まず、磁石と鉄玉を用いて、前提である「鉄玉は磁石に吸着する」という常識の実証実験を行う。それを確認した後、矛盾を誘発させるための実験を見せる。見せる実験は、3号器あるいは4号器を用いる。これを見せる場合、小学生でも使えるようにするために小型化・軽量化にしたので鉄玉が浮揚する状態を全員に見せるには、工夫が必要になる。つまり、拡大して見せるために書画カメラを用いる。これを用いて、浮揚している鉄玉を拡大して投影すれば後ろの方に座っている学生でも十分に見ることができるようになる。これによって、矛盾を誘発させる。

1回だけでは、信じられない者もいるので、繰り返し見せる。それでも信じられない者がいそうな場合は、「やってみてほしい人は手を挙げてください」と言って希望者に実験器と磁石を渡して、実際に体験してもらう。ここまで行くと、ほとんどの学生は、前提

と異なる事象が存在することを認めるようになる。

これ以降は、「何故鉄玉は磁石に吸着せずに浮揚するのか」について、その理由を理解し、知識の再構成を行うための作業を行う。直ぐに答えを説明することは行わず、作業を行いながら、結論まで導くことを行う。

始めに行う作業は、「何故、鉄玉が磁石に吸着するのか磁力線の模様を使って説明せよ」という発問に対する回答作業をさせる。磁石鉄玉の配置は、実験で行った配置にする。状況を見て、しばらくした後、「鉄玉間の磁力線の模様は、どうなるか確かめてください」という指示を出す。さらに、時間をおいて、「その模様からどんな力が作用すると思いますか」という発問を行う。そして、任意に指名した学生に答えさせる。その答えを用いながら、斥力が働くということへ理解を誘導する。

また、このことを説明するために、棒磁石を2本用意し、ホワイトボードに磁極をそろえて並列に並べてみせる。そうすると、磁石間に斥力が作用するので2本の磁石は、ある距離を保って離れて存在するのがわかる。これと同じことが鉄玉間に起きていることを理解させる。そして、この斥力と磁石と浮揚している鉄玉間の引力および重力の3つの力のバランスによって浮揚するというところで説明を終える。

この後、追加実験として、磁石による鉄玉の磁化に関する別の実験を演示する。実験に用いるのは、U型磁石、鉄板（100mm×50mm）、鉄玉（直径30mm）である。始めに、片手でU型磁石を持ち、目の高さ辺りに固定する。そして、もう片方の手に鉄玉を持ち、磁極に近づけ、鉄玉が吸着するのを確かめる。ここで前提の確認を行い、U型磁石の磁極間を鉄板で塞ぐ（吸着させる）。それを片手で持ち、目の高さ辺りに固定し、同じように鉄玉を磁極に近づける。そうすると、鉄玉が磁石に吸着しないのがわかる。これにより、矛盾を発生させる。何回やっても吸着しないことを確認した後この事象の説明を始める。

ここから、知識の再構成のための作業を始める。上記したような流れで行い、「透磁率の高い鉄板で磁極を塞いだ場合、磁極間の磁力線は、そのほとんどが鉄板の中を通るようになる、すなわち鉄板の外部の存在する磁力線が少なくなる。したがって、前と同じように磁石に近づけても、鉄玉が磁化される度合いが弱くなる。よって、磁石との引力も弱くなり、落下する」という結論へと導くようにする。これらの事象を観察・体験することを通して、磁石と磁性体に作用する力は、磁化という現象を経て起きることおよびそれに関わる事象は、条件により変化するという事実が存在することを知ることになる、そし

て、知識の再構成を行うという一連の学習行為を経験させる。ここまでの第一段階、すなわち条件によって鉄玉が磁石に吸着しない場合がある事象の説明である。

次に、浮揚した鉄玉が無接触かどうかについての話を進める。まず、無接触で浮揚する場合とそうでない場合、すなわちケースのどこかに接触しながら浮揚する場合とがあり、今回観察したのは、後者であることを学生に知らせる。そして、この状態を検証するために、ケースの側面を取り除いたものを用いて実演する。そうすると良くわかる。つまり、側面がなくなったために、鉄玉は浮揚せずに磁石に吸着する様子を見せることができる。

実験の一例を図12に示す。図12は、これまでのように、ケースを使わないで鉄玉を浮揚させる実験器である。ケースがないので、鉄玉を触ることができ、鉄玉に適当な力を加え、場所を移動させ、力を取り除くということを行いながら、鉄玉の反応を見ると、鉄玉に作用している力の状態を概観することができる。

図12を見ると、左側の壁に鉄玉が吸着しているのがわかる。ここで、浮揚している鉄玉をつまみ、右側に少しずらし、指を離すという動作を段階的に行う。始めのうちは、浮揚点に戻る動作を示すが、ある地点に鉄玉を移動させると、鉄玉は浮揚点に戻らず、右側に勢いよく移動ようになる。移動した鉄玉は、磁石に吸着する。この一連の動作を体験する（体験させる）と鉄玉の状態が良くわかるようになる。これを体験するのとしなないとでは、大きな違いがあることは、容易に想像できる。

つまり、1) 鉄玉には、どの程度の力が、どの方向に作用しているのか、2) どの方向に、どこまでずらせば、浮揚が崩れるのか、などについて、体感しながら理解することができる。この部分は、言葉や数式では伝えることが困難であり、体験しないとわからないことである。いわゆる経験知を得る（与える）意味で、この実験は有意義である。

その後、何故、無接触で浮揚できないかについて説明を行う。ここで重要になるのがアーンショーの定理である。この定理の骨子について数式（微分方程式）とイラストを使って話をする。つまり、物体が安定に浮揚するためには、三次元方向の全ての方向において、ポテンシャルエネルギーが極小にならなければならないということについて解説を行う。そして、磁石を使った場合、その条件が満たされないために、安定に空中に浮揚することが不可能であるという結論までの説明を加える。

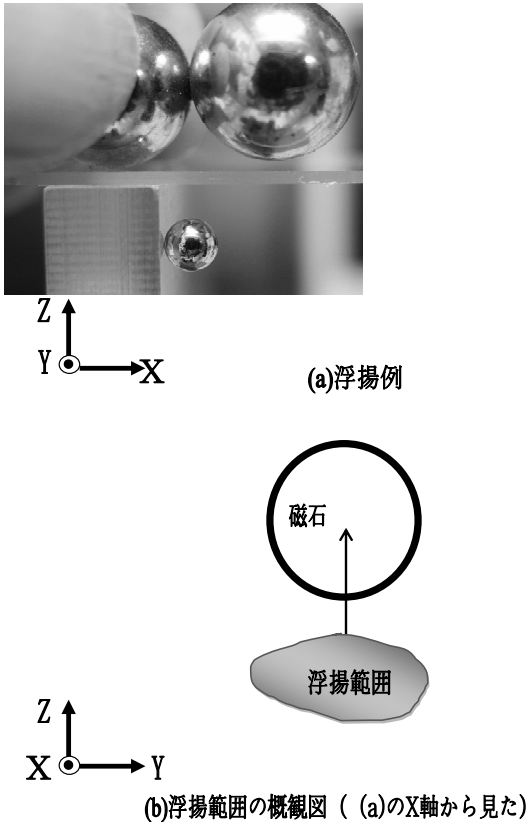


図 12 ケースを用いないで鉄玉を浮揚させる実験例

最後に、この事象の主役である復元力についてベクトル図 (図 13, 14 参照) を使って話をします。鉄玉に常に磁石からの引力が作用しており、鉄玉間には、斥力が作用していることである。この力のバランスが磁石とケース間の距離を変えると変化する。この変化の過程に浮揚する条件が含まれる。これが、ポイントの概要である。

ここで、この復元力について、ベクトル図による理解を深めるために、体感型の実験を行う。実験は、図 12 のものを使って行った。図 13 で示したように、復元力とは、鉄玉が安定に浮揚する位置から少しずれたとき、元の位置に戻そうとする力である。そこで、安定に浮揚している鉄玉に、外力を与えて、その位置を少しずらした時に、鉄玉が元の位置に戻るかどうかを確認した。指で鉄玉を移動させ、その位置で指を離すという方法で観察した結果、元に戻る、すなわち復元力が存在するのが確認できた。つまり、

図 13 の話は、想像ではなく、現実であるのが確認できた。また、ずらす距離を少しずつ長くしていくと、ある地点で鉄玉は、落下するようになる。この距離を、三次元方向に測定すると、復元力の作用する範囲がわかるようになる。この実験は、鉄玉が浮揚する条件、復元力の存在およびその範囲などの要因を直接手で触りながら体感できるので好都合である。これらの事柄を交えながら話をを行い、この事象の説明を総括して終わる。

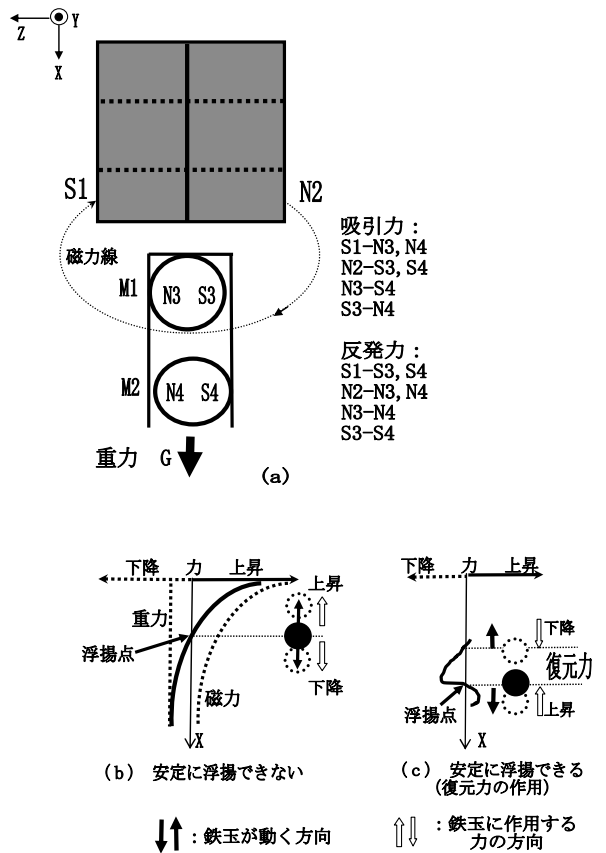
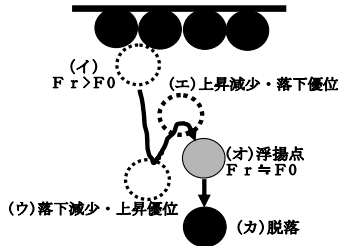


図 13 鉄玉に作用する力のイメージ図

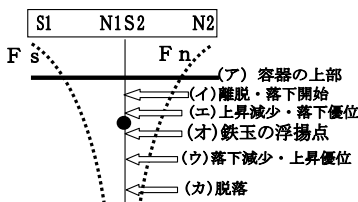
実は、この実験が実現するまでは、図 13, 14 を用いた話だけだったので、実感がわかなかった。しかし、復元力の実験ができるようになってからは、学生に実感を与えることができるようになった。この後に、上記したように、学生と意見交換を通して、実験器を含めたに授業全般についての改善点を見つ

け出す作業を行う。

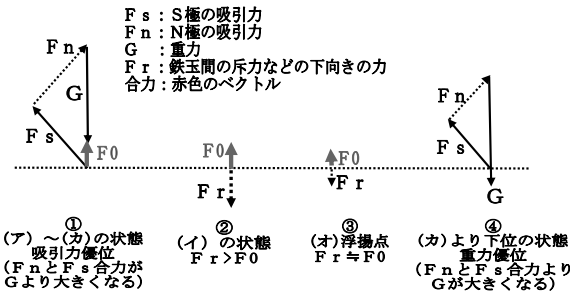
以上が実施の一例である。なお、実施内容は、その時の学生の状態や授業の進行状況により変わる場合がある。



(a) 離脱から浮揚までのイメージ図（図2（f））



(b) 磁石下部における鉄玉の動作位置の概要図



(c) 各位置におけるベクトル図の概要図

図14 浮揚現象の検討に用いるイメージ図

2.2.4 結言

磁石と鉄玉を用い、前提・矛盾・再構成を用いた授業展開を試行した。「狭いケース内に閉じ込めた鉄玉に磁石を近づけると磁化された鉄玉が並列に並ぶことにより、斥力が発生し、その力と磁石からの引力、重力などのバランスによって磁石に吸着せず、浮揚する場合がある」という事実を矛盾の核とした授業を展開した。その結果、得られた実験結果の有効性を確かめることができた。

2.3. 実験 3（水滴を静電気で消す）

2.3.1 諸言

水滴は、常温の場合は時間経過とともに蒸発して無くなる。熱を加えればその時間が短くなるというのが常識である。しかし、熱を加えなくとも短時間で水滴が無くなる場合があるのを確認した。何をやるか、それは静電気を使うのである。静電気を使うことによってあっという間に水滴を無くすることができる。これは上記した矛盾を誘発させるための実験の一つとして使えると考え、再度実験を行い、事象を詳しく観察することにした。

2.3.2 観察結果

(1) 水のレイリー分裂

分極には、外部から電界が加えた時に起きる場合と電荷を加えなくても始めから双極子となっているものがある。前者のことを電気分極と呼び、この現象を誘電現象という。後者のような性質を持つ分子を有極性分子という。水はその代表的なものの一つである（図15）。水が有極性であることを利用して、静電気と物質の関係を確かめる実験教材の材料としてよく用いられる。

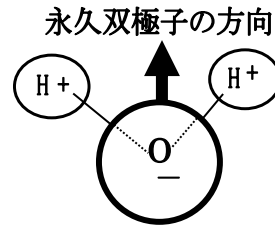


図15 水分子における電荷分布状態の概観

水流に帯電物を徐々に近づけた場合、ある距離に達すると垂直方向に流れ落ちていた水流が帯電物の方に曲がるようになる。これは、有極性の水分子と帯電物の間に発生したクーロン引力が自由度の大きい水流に作用するためである。この実験は、静電気を使った実験として良く用いられる一つである。それに対して、水滴のレイリー散乱現象は珍しい実験の一つと筆者は考えている。その機構について次のように述べられている^{8,9)}。毛細管現象により吸い上げられた水を含んだセラミックの先端部分に高電圧をかけることにより、吸い上げられた水が高いエネルギー（電荷）を受け、表面張力を超えて、最初約数百 nm もの水の粒子が発生する。発生した水の粒

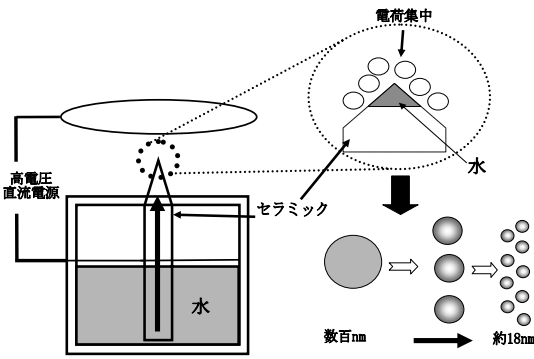


図 16 微粒子水のレイリー分裂の様子^{8, 9)}

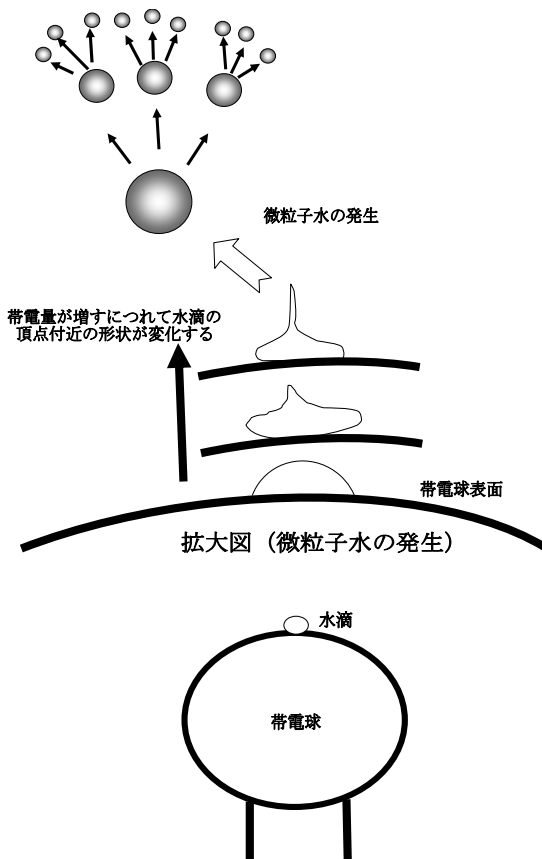


図 17 微粒子水の発生する様子の概観

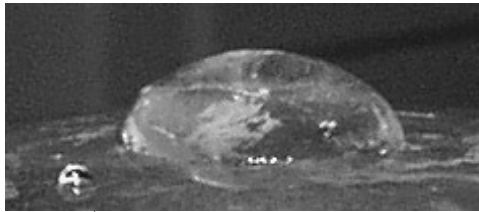
子は、静電的な力により、約 18 nm までの微細な粒子に段階的に分裂する(図 16) この現象は、筆者が静電高電圧発生装置(ツインタワーバンデグラフ、以下、バンデグラフと略す)を使って、いろいろな実験を行っている過程で、偶然に遭遇した。帯電球の頂点付近に水滴をたらし、帯電させたらどうなるだろうと思いつながら、無造作に帯電量を増やした結果、水滴があつという間に無くなってしまった。これを見た瞬間、何が起きたのか分からなかった。その後、帯電量を徐々に増やしなが、水滴の変化を観測した結果、帯電球面上の水滴は、その形状を変えながら、微細な粒子に分裂することがわかった(図 17)。熱を加えたわけでもないのに、水が無くなる現象は、当時、筆者が目指していた、矛盾の認知を誘発する実験教材の実現というテーマに適していたので、大いに興味を持った。その後、連続的に水滴を供給する装置を作り、連続的にレイリー散乱が起きるようにした。

これらの事象は、筆者の電磁気学の授業で毎年演示している。しかし、この事象は、瞬間的であり、かつ透明な水を使っているために、散乱の様子を目視するのが困難である。したがって、説明を聞いても、よくわからないだろうなという印象を持たせていたことをずっと気にしていた。そこで、これへの対応として、事象に関する映像を得ることを考え、その方法について検討した結果、写真を取ることにした。

(2) 水滴の写真撮影

実験にはバンデグラフ、水および写真機を用いる。水滴の形状変化は、ランダムに起きるので事象が始まったことを確認した後、水滴にピンを合わせてランダムに写真を撮り続けた。その後、出来栄を見て、良さそうなものをピックアップするという方法で行った。そして、撮影条件を変えながら、満足な結果が得られるまで続けた。水滴の状態をできる限り近くで撮影しようとしてバンデグラフの帯電球に近づくと放電が起きる。それを防ぐために遠ざかると、水滴の細かな変化を撮影することができなくなる。このようなジレンマと戦いながら、時には放電による感電を体感しながら、辛抱強く撮影を行った。その結果、いままで抱いていたイメージよりも、鮮明な映像を記録することができた。

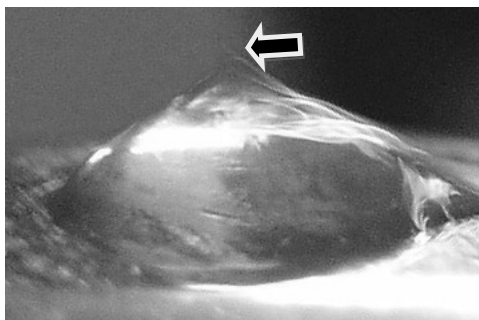
図 18 に観察例を示す。図 18 の状態は、“バリ・バリ”という音と共に出現する。半円状であった水滴の表面が図 17 の概観図に示してあるように中央が上部に引っ張られ尖っている状態を記録することができた。肉眼で見えたことを記憶しているよりも鮮明に



(a)帯電前



(b)横方向から撮影



(c)斜め上から撮影

図 18 レイリー分裂時の水滴の形状（その 1）

その状態を知ることができた。また、記録した中には、先が尖った状態の他に逆に凹んだ状態の映像もあった(図 19)。この状態は、正確にはわからないが、肉眼で見る限りでは、図 18 の状態が終わってからすなわち微粒子水が生成した後に起きる変化であると考えられる。中央が尖った状態は、継続的に起きているのではなく、途切れ途切れに発生している。つまり、中央が尖った状態とそうでない状態が混在しながら起きており、水滴の表面は波打ったように動いている。図 19 は、後者の状態すなわち尖っていない

い状態の一例である。ビデオに記録すればよりダイナミックな映像が記録できるが、それは今後の課題としたい。

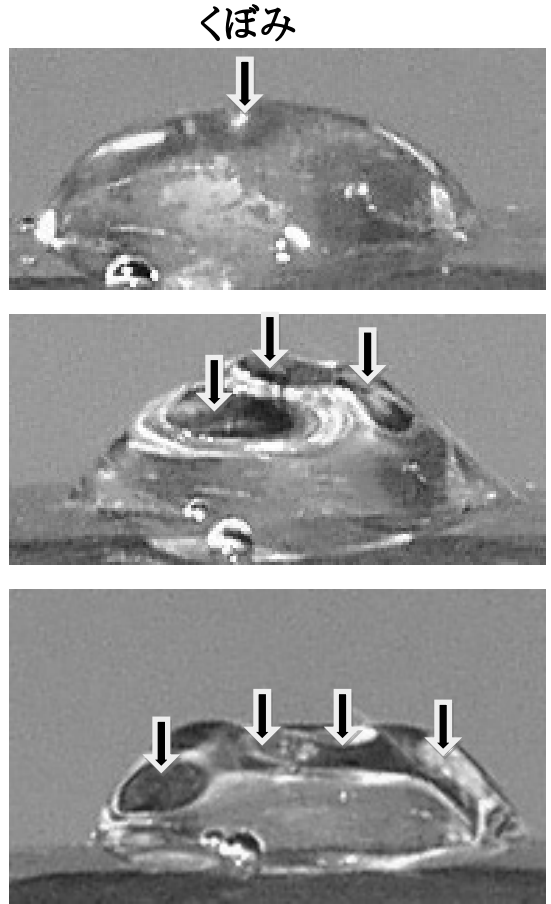


図 19 レイリー分裂時の水滴の形状（その 2）

2.3.3 授業実施例

以下では、筆者が担当する授業で行った実施例について概要を述べる。

まず、「水滴は、熱を加えればすぐに蒸発して無くなるが、常温の場合は、蒸発するがそれよりも時間がかかる。すぐにはなくなる」という常識的な話をする。その後、帯電球の上に水をたらし、小さな水滴を作る。そして、その水滴がすぐには無くならないことを演示する（前提の確認）。それを確認した後、矛盾を誘発させるための実験を見せる。帯電球の頂点にたらしした水滴にさらに水を追加して、半

円状態の水滴を作る。水滴の大きさは、5~10mm程度とする。小さすぎると事象を確認するのが困難になる。また、大きすぎると帯電時に起きる駆動モータの振動により、水滴がつぶれてしまうなどの問題が発生するので、注意が必要である。適切な大きさの水滴ができれば、徐々に帯電量を増やしていく。その時、水滴に注目させる。帯電量が増えるにつれて“バリ・バリ”という放電音が聞こえるようになり、それに伴って、半円状態であった水滴の表面が揺れ始まるのがわかる。と同時に、水滴が揺れながら上方に引っ張られたような形状変化が現れ、徐々に水滴が小さくなるのがわかる。そして、ある時間経つと水滴は無くなる。この後、帯電球を触ってもらい、加熱していないことを確かめさせる。ここで、加熱もしていないのに何故、水滴が無くなったのだろうかという矛盾を感じさせる。

水滴は、小さいので拡大して見せるために書画カメラを用いることを試したが、静電誘導の影響によりうまくいかなかった。他の方法も試したが、うまくいかなかったので、十名ずつ前に出てきてもらい、直接肉眼で確認させることを行った。終了するまで時間がかかるが、直接確かめることで、強い矛盾を抱くことが期待できるのでそのようにした。時間を節約し、確認を疎かにすると、矛盾の認知が弱くなり、その後の知識の再構成の意欲も弱まるという心配もあるので、時間をかけてこの確認作業を行った。

何回やっても水滴が熱を加えないのに無くなってしまふことを確認した後に、この事象の説明を始める。ここから、知識の再構成のための作業を始める。上記したような流れで行い、水滴に静電気を与えた場合、「熱を加えなくとも、水滴がレイリー分裂を起こすために無くなる」という結論を含めた新たな知識が内面化させる。この後に、上記したように、学生と意見交換を通して、実験器を含めた授業全般についての改善点を見つけ出す作業を行う。

以上が運用の一例である。運用は、その時の学生の状態や授業の進行状況により変わる場合がある。

2.3.4 結言

水滴と静電気をを用い、前提・矛盾・再構成を用いた授業展開を試行した。「水滴は、気化(蒸発)して無くなるのが一般的であるが、熱を加えなくとも、静電気(レイリー分裂)を使えば短時間で無くなる場合がある」という事実を矛盾の核とした授業を展開した。その結果、得られた実験結果の有効性を確かめることができた。

3. 全体のまとめ

本研究では、筆者が担当している電磁気学の授業開発の試みの一つとして、前提・矛盾・再構成という過程を用いた授業を実践した。これまで筆者が行ってきた実験から適切な題材を探し出した結果、「同極の磁石を近接させた場合、反発する」という前提に対して「条件によって吸着する場合がある」という矛盾、「鉄玉は磁石に吸着する」という前提に対して「狭いケース内に閉じ込めた鉄玉に磁石を近づけると磁石に吸着せず、浮揚する場合がある」という矛盾、「水滴は、常温の場合は時間が経つにつれて徐々に蒸発して無くなる。熱を加えればその時間が短くなり蒸発して無くなる」という前提に対して、「熱を加えなくとも、静電気を使えば短時間でなくなる場合がある」という矛盾、の3種類の事象を用いることを考えた。

これらの事象を演示するために必要な準備を整えた後、実際に、筆者の担当する授業において実施した(受講生約50名)。学生の反応から、いずれの事象についても、多くの学生に矛盾を誘発させることができたという印象を持った(統計的な処理を行っていないので、あくまでも主観的な判断である)。

その後、この矛盾の解消のために行う作業を通して、知識の再構成を促したが、その状況には個人差が現れた。その差は、学力的な差なのか精神的なものなのか判別するのは困難であった。対話を通して得た印象としては、学習歴の違いよりも興味・関心・態度などの個人差が大きいに感じた。つまり、前提条件の違いが、それ以降の過程すなわち矛盾・再構成の作業に影響が及んだものと考えられる。このような学習者の反応は、認知的な視点から眺めても、おかしなことでも珍しいことでもなく、当然の結果といえる。その理由は、学習は、学習者自身が行う行為なので、その内容およびそのペースは学習が支配するからである。教授側は、その手助けをするに過ぎず、学習者の反応を支配したいと考えても、実際に支配することは困難なのである(形式上の支配は可能かもしれない)。それによるジレンマは常に感じることである。

いずれにしても、本研究において前提・矛盾・再構成ということを用いて構成した授業を試行した結果、決められた時間内で知識の補給や再構成を導くのに有用であることが実感できた。

今後は、知識の再構成段階に着目した授業すなわち学習者の意識や思考の流れに着目した授業^{22, 23)}を展開したいと考えている。そのためには、技術的な面^{24, 25)}のみならず、これに関する知見を深めるのが肝要と考えている。人間が人間を制御することは、不可能であるという結論を踏まえ、どこまで関与で

きるかを体験・実感したいと考えている。また、これに似たものとして仮説実験授業²⁶⁾というものがあり、過程が異なるだけで、学習者に期待していることが同じであるので、この手法を用いた授業の実施も試行したいと考えている。さらには、現存のシステムには適合しないが、個人授業を展開し、学生の心に内在している多くの壁を除くことも試みたいと考えている。

学習者には、教授側の意図するような反応を示す者と、その逆の反応を示す者に加えて、反応がほとんどない者が存在することを今回の授業展開においても感じた。三番目の反応への見方は、さまざまである。大別すると、その解決責任が学習者側に存在するという見方と教授側にその一端があるという見方がある。筆者は、基本的には前者の見方である。その理由は、学習行為は個人的なものであり、教授側の人間を含め外部の人は、その手助けにしかならないという基本的な考えがあるからである。つまり、学習者の学びによって教授側の行為が成り立つのである²⁷⁾。この考えは、ガリレオの「人にものを教えることはできない。できることは、相手の中にあるすでにある力を見出すこと、その手助けである」という言葉で容易に理解できる²⁸⁾。また、朝永信一郎氏の「魂が許さないものは身につかない」という言葉からもうなずける。さらには、松下幸之助の「学ぶ心さえあれば、万物すべてこれわが師なり……中略……これらすべてに学びたい。」という言葉から学びの本質を窺うことができる。

教育には、「こうすれば、こうなる」という法則的なものはないといわれている。その大きな理由は、人間が関与しているからである。人間の特性、すなわち人間の情報処理過程への理解が不十分であるためである。さらには、個人差についても理解が十分である。最近、脳科学の発展に伴い、以前よりは知見が増えてきたが、まだまだ不十分である。そのような状況が教育行為に大きな課題をもたらしているのが実情である。したがって、教授側の経験則に依存した方略が展開される場合が多いのである。

最近、筆者は、自己調整学習(者)に興味を持っている。簡単に言えばメタ認知を使った学習行為のことである。興味を持った理由は、「教育の最終目標は、教育をしないう済むようにすることである」という考えに類似する意味を持つ言葉の一つであると感じたからである。

自己調整学習を平易に表現するならば、学習に関わる行為を客観的に見ながら自分で調整しながら学ぶことであるといえる。このことは、実は、筆者が学生であったころは、ほとんどの人が当たり前に行

っていたような気がする。最近では、そのような学生が減ってきているという印象を持つが、時代がどのように変わろうとも、自律した生活を送るためには、自己調整学習を若いうちに身につけなければならないと筆者は強く思う(これを実践しているのがフィンランド教育である)。

孔子の格言に「魚を一匹もらうと、一日は食べていける。魚釣りの方法を学ぶと、一生食べていける。」²⁹⁾ というのがある。この格言を知った時、最初の一文に書いてあることは、筆者が今までやってきたことであり、その次に書かれていることをこれからやるべきであると感じた。二つ目の文章は、正しく自己調整学習者になる必要性を示唆している。

最近の大学は、筆者が学生であったころと比べると学生に対する世話の内容は、大きく変わってきた。中には、そこまでやるかという印象を持つようなものまで実施しているところもある。筆者は、どのような世話をして良いか、その前提として、学生の機嫌取りあるいは自律を妨げる無責任な単なるサービスではなく、自己調整学習の修得およびその力の向上を目指していることを教授側・指導側および学習者が共に認識していなければならないと考える。この共通認識を持つかどうか大きなポイントである。極端なことを言えば、自己調整学習の修得およびその力の向上を目指すのが目的であり、それ以外はすべてそのための手段であると言っても良い。授業もその手段の一つである。本研究で実施した授業もそのようなことを背景として行ったものである。授業中のやり取りに関しては、それなりの反応を得たが、本来の目的すなわち自己調整学習に関する効果の有無については、それを確かめる具体的な手段を持っていないので確認することができなかった。これについては、今後の課題である。

授業改善というと教授側における改善と理解する 경우가多いが、教育行為が相互行為あるいは協働作業であることを踏まえると、学習者自身も改善する必要がある。自己調整学習をキーワードとして、互いに協働する必要がある。そうでなければ、授業改善は困難である。どちらかといえば、学習者自身の役割の方が大きいと考えている。これは、筆者が学生であったころの状況からも容易に理解できる。

現在、様々な改善の実施例が紹介されているが、その効果を支配するのは、学習者の認識と行動であるといえる。このことに意外と気が付いていない場合が多いように見受けられる。

今回の授業を通して、教育行為における改善は、教授側の一歩通行的な方策では叶わず、必ず学習者との協働で行うべきであることを改めて痛感した。

今後は、この経験を活かし、学生との対話を通して、効果的な授業の在り方を追求したいと考えている。最終的には、自己調整学習者の実現を「学習者の、学習者による、学習者のための授業」の実現によって確認したいと考えている。

参考文献

- 1) 辻本昭彦 (2012) 学習論のすすめ—学習論で授業改善は図られるか— 理科の教育, **61**, 19-21.
- 2) 稲垣佳世子・鈴木宏昭・亀田達也 (2003) 認知過程研究-知識の獲得とその利用- 放送大学教育振興会 pp.157-160.
- 3) 近藤信一 (2008) ズレを発見していく授業展開の工夫 —
- 4) 小谷内寿信 (2009) 子供たちの中に生じたズレや矛盾を生かせる授業づくりをめざして—3年生「明かりをつけよう」の実践から— 初等理科教育, **43**, 62-65.
- 5) 辻健 (2011) 子供たちのイメージを大切にしながら、知を更新する授業について 初等理科教育, **45**, 22-25.
- 6) 伊藤洋康 (2014) 子供の認識のずれのある事象提示から生まれる問題解決学習 初等理科教育, **48**, 30-33.
- 7) 露木和男 (2012) 「前提・矛盾・再考性」と問題解決の授業 初等理科教育, **46**, 14-17.
- 8) 編集部 (2004) 水粒子コントロール技術で空気をきれいに! OJM BULLET, **39**, 10.
- 9) 山名正人・光武義雄・前川哲也・須田洋・山内俊幸 (2007) 放電による帯電微粒子水の発生メカニズム 松下 電工技報 (現パナソニック技報), **55**, 29-34.)
- 10) 日置光久 (2003a) 個に応じた理科指導の展開 小学校3年 東洋館出版社.
- 11) 日置光久 (2003b) 個に応じた理科指導の展開 小学校4年 東洋館出版社.
- 12) 日置光久 (2003c) 個に応じた理科指導の展開 小学校5年 東洋館出版社.
- 13) 森本信也・八嶋真理子 (2009a) 子供が意欲的に考察する理科授業 小学校3年 東洋館出版社.
- 14) 森本信也・八嶋真理子 (2009b) 子供が意欲的に考察する理科授業 小学校6年 東洋館出版社.
- 15) 森本信也・八嶋真理子 (2010a) 子供が意欲的に考察する理科授業 小学校4年 東洋館出版社.
- 16) 森本信也・八嶋真理子 (2010b) 子供が意欲的に考察する理科授業 小学校5年 東洋館出版社.
- 17) 猿田裕嗣・中山迅 (2011) 思考と表現を一体化させる理科授業 東洋館出版社.
- 18) 文部科学省 (2012) 中学校学習指導要領解説 理科編 大日本図書.
- 19) Sasaki,S, Yagi,I. Yagi & Murakami, M. Murakami(2004), Levitation of an iron ball in midair without active control, *Journal of Applied Physics*, **95**, 2090-2093.
- 20) Sakurai, Y(2008). On the iron ball levitation phenomenon using the magnet, *Journal of Applied Physics*, **104**, 044503-1-044503-6.
- 21) Earnshaw,S, On the Nature of the Molecular Forces which regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, **7**, 97-11.
- 22) 高岡洋介 (2012) 子供の思考の流れを意識した単元構成と教師による焦点化—4学年「電気のはたらき」の実践を通して— 初等理科教育, **46**, 26-29.
- 23) 中本幸志 (2014) 子供の意識の流れを柱にした問題解決 初等理科教育, **48**, 26-29.
- 24) 藤井浩樹 (2013) 理科の教材研究と授業づくり 理科の教育, **62**, 5-8.
- 25) 吉澤純夫 (2013) ストーリー性を重視した実験授業の展開例 理科の教育, **62**, 46-49.
- 26) 庄司和晃 (2000) 仮説実験授業と認識の理論 季節社.
- 27) 佐藤学 (2011) 教育の方法 左右社.
- 28) 櫻井勇良 (2013) 格言・名言から観る物理・科学教育観 物理教育, **61**, 76-77.
- 29) 塚野州一・牧野美智子 (2010) 自己調整学習の指導—学習スキルと自己効力感を高める— 北大路書房.