

原子・分子の実在性を考える教材の研究

－ 原子論の歴史を題材に －

後藤田洋介

(奈良教育大学大学院 教科教育専攻 理科教育専修)

片岡佐知子

(奈良教育大学 理数教育研究センター)

Study of Teaching Materials for Understanding the Existence of Atom and Molecule Based on History of Atomism

Yosuke GOTODA

(Graduate School of Education, Nara University of Education)

Sachiko KATAOKA

(Center for Educational Research of Science and Mathematics, Nara University of Education)

要旨：ブラウン運動は原子の実存の証拠となることが知られており、科学史の中でも重要な実験として取り上げられている。本研究では、ブラウン運動を中心とした科学史を通して原子・分子の実在性を考える教材を作成した。学校教育で実践することを最終目標としているが、その前段階として大学の物理学実験の課題の一つに、ブラウン運動の実験を取り入れた。本稿では、作成した教材の目的及び内容を紹介するとともに、学校現場での実践に際しての課題について報告する。

キーワード：ブラウン運動 Motion of Brownian particles
科学史 Science history
原子・分子の実在性 Existence of atom and molecule

1. はじめに

本研究では、原子や分子の存在を実感するための科学史の教材とブラウン運動の実験教材を提案する。ブラウン運動は科学史の中でも、原子の実在に関する議論に終止符を打った実験・理論として重要な位置づけを占めている。原子論の変遷を追いながら、ブラウン運動の実験を学ぶことにより、原子・分子の存在を実感することができるだろう。

現在施行されている学習指導要領においては、理科は「エネルギー」「粒子」「生命」「地球」の4つの分野を柱としている。その中でも「粒子」の分野は「粒子の存在」「粒子の結合」「粒子の保存性」「粒子のもつエネルギー」の4つから構成されており、粒子モデルを使って物質の様々な現象を説明することに重点が置かれている。この粒子モデルについて、村上（2010）は、粒子概念に関する理解度のアンケート調査を行っている。この調査では、中学2年生に粒子概念の説明をした後に、粒子概念に関する問題を3問解答させ、その結果を分析している。この結果から中学生や高校生に粒子概念が定着していないことを明らかにしており、物質の基本粒子の理解が不十分

分であるとしている。中学校での学習指導要領では、物質が原子や分子からできていることを指導するように書かれているが、原子や分子の実在については詳しく言及されていない。また、原子・分子と関連しているイオンの単元では、電気分解の実験を行うことで、イオンの存在を示すことが書かれているが、原子・分子の実在性を直接的に取り扱っていない。高等学校学習指導要領では、原子・分子の実在を前提として内部構造について詳しく取り扱うことに重点が置かれている。以上から、粒子に関する基礎的な内容が定着していない状況の背景として、原子・分子の実在に関する内容の学習が行われていないこととの関連があるのではないだろうか。粒子モデルで説明することに重点を置くだけでなく、原子・分子の実在という本質的な理解を促す教材が必要であると考えた。

ブラウン運動は、原子・分子の実在の証拠を与えた実験の一つとして科学史上重要な現象である。このブラウン運動の観察実験より、アヴォガドロ数を求めることができ、粒子モデルによる説明の確かさを裏付けることができる。学習指導要領物理において、ブラウン運動は、熱と温度の単元で、原子や分子が熱運動をしているということを説明する実験の一例として扱われており、温度

と原子・分子の熱運動を結びつけるように書かれている。学習指導要領化学では、コロイド溶液の性質としてブラウン運動を扱うこととしている。このように高等学校ではブラウン運動を扱うことが学習指導要領に示されているが、必ずしも粒子の実在性を示す実験としては扱われているわけではない。ブラウン運動の教材化に関する先行研究として、福島ら（1999）の研究がある。この研究では、ブラウン運動の簡単な観察法が提案されているが、定性的な観察にとどまっている。

科学史の理科教育において果たす役割について高橋（1985）は、科学史を教えることで、知識を断片的なものから筋の通ったものにかえていくことができるとし、また、原子や場などの、見たり触ったりすることができない科学的な概念がその発展史と共に学ぶことで、理解を促すことができるとしている。科学史を理科教育に導入することで、得られる成果は多い。さらに、高等学校学習指導要領では、歴史的な方法、歴史的な実験、歴史を調べるなどの文言が複数個所に渡って確認することができる。高橋（1985）では、導入する科学史の学習が、読み物教材と再現実験とセットになったようなものや、再現映画のようなものによって、子どもたちの法則や概念に対するイメージを豊かにする必要があると述べてい

る。このように、科学史上のある発見を述べるだけでなく、読み物教材と再現実験をセットにしたものを作成する必要があるのではないかと考えられる。

他教科との関連としては、社会科では、科学技術の発展等を扱うことが記されている。しかし、科学史を系統的に扱うような記述はない。したがって、各時代ごとに取り上げられている科学史の内容を、理科の原子・分子という一つの視点から系統的に学ぶことに意義があると考えられる。

以上より、ブラウン運動を中心とした科学史を通して、原子・分子の実在性を考える教材の開発を着想した。

本報告では、作成したブラウン運動の教材の概要、及び実験方法の概要を報告する。

2. 目的

「原子・分子の実在」という本質的な理解をうながす科学史を主体とした教材を作成・検討する。

また、大学レベルのブラウン運動の実験方法は既存のものがある。これらを活用し、中等教育で実施可能な実験方法の検討を行う。

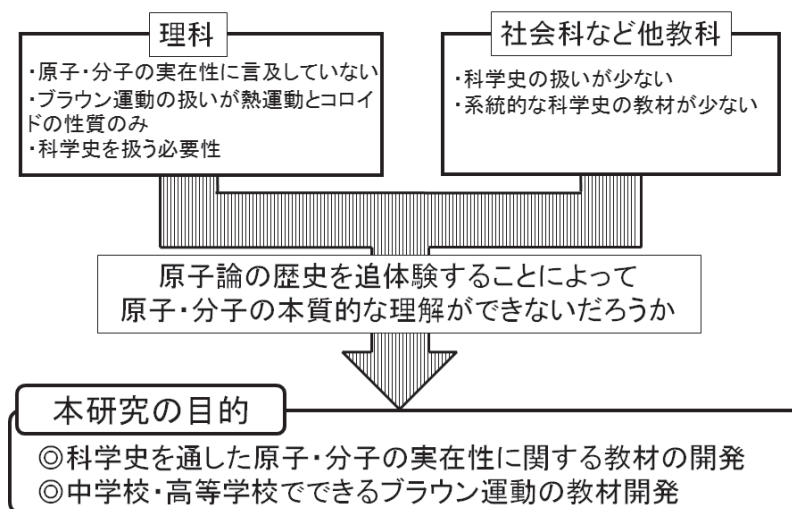


図 1 本研究の概念図

3. 方法

3. 1. ブラウン運動の理論

ブラウン運動は、イギリスの植物学者ロバート・ブラウンによって発見された現象である。この現象は、液体中の微粒子が、顕微鏡上で不規則に動く現象である。この運動をする微粒子をブラウン粒子という。ブラウンは顕微鏡で花粉の観察を行っているとき、花粉の膨潤によって流出した微細な粒子が、不規則な運動をしていることを発見した。ブラウン運動はブラウンによって研究がすすめられたが、その原因はわからず、20 世紀の初頭、

アルベルト・アインシュタインによって、水分子の衝突と、統計の手法を用いることによって現象が説明され、原子の実在を証明する証拠として提唱された。その後、アインシュタインの理論は、ジャン・ペランによって実験的に証明された。次の式は、アインシュタインの関係式と呼ばれるブラウン運動を表した式である。

$$\langle x^2 \rangle = 2Dt$$

ここで、 $\langle x^2 \rangle$ はブラウン粒子の変位の大きさ x の平均、 D は拡散定数、 t は時間を表している。この式から、ブラウン運動の観測から得られた $\langle x^2 \rangle$ を縦軸、時間を横軸にとり、その近似曲線が一次関数になっていればア

インシュタインの理論を確認することができる。この理論は水分子の衝突を仮定しているので、分子の実在の証拠の一つになりうるのである。

また、アインシュタインは気体の法則と溶液の法則を援用し、以下のような式を提案した。

$$N_A = \frac{1}{6\pi\eta a} \frac{RT}{D}$$

N_A はアヴォガドロ定数、 η は媒質の粘性係数、 a はブラウン粒子の半径、 R は気体定数、 T は媒質の絶対温度である。測定によって決定した D より、アヴォガドロ定数を計算することができる。アヴォガドロ定数はこのブラウン運動の測定以外にも計算することができるので、それらの結果と比較することで、この理論の確かさを実験によって確かめることができる。

3. 2. 実験装置と解析方法

ブラウン運動の実験を大学の実験教材として検討したものに、青木・柴崎 (2006) がある。ここでは、ブラウン運動を学生実験に導入するために、粒形や観測の方法を検討している。観測の方法としては、CCDカメラを用いてブラウン運動の様子を観測し、パソコンに出力した後、パソコン画面上にOHPシートを貼り直接写し取るといったものである。本研究では、この研究を参考に、実験的テキストを作成した。しかし、実験を再現したところ、スライドガラス上に粒子が運動をする空間を作る方法に検討の余地があったため、改良を加えた。具体的には、スライドガラスとカバーガラスの間にポリエチレンテープ（厚さ約 50 μm ）を用いる方法を新たに導入した。このテープはシンクなどの傷を防止するための表面保護テープである。このテープを用いることで、塗りムラの心配がなくなった。観察が容易なプレパラートを作成できる。ポリエチレンテープを用いたプレパラートの作成方法は次の通りである。(図2)

解析には、20 秒間隔で 2 分間の粒子の変位の測定結果を用いる。また、測定粒子数は 5～8 個とした。

1. ポリエチレンをカッターナイフで5～8枚重ねて、3 cm程度切りだす。
2. ポリエチレンテープを重ねたまま、中心を穴あけパンチで穴をあける。
3. 穴をあけたポリエチレンテープを1枚はがし（上下のテープは用いない）、スライドガラスに貼る。この時、気泡ができないように気をつける。
4. 3のスライドガラスに試料を一滴下し、カバーガラスをかける。

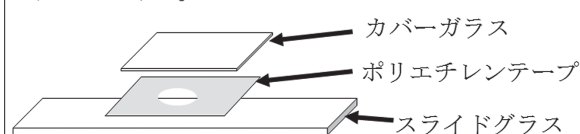


図2 プレパラートの作成方法

3. 3. 科学史教材について

ブラウン運動を教えるための教材として、科学史をベースとしたテキストを作成した。テキストの内容や用いたイラストは、すべてオリジナルである。(図3)

科学史をもとに原子や分子の存在を説明しているものに、江沢 (1976) がある。本テキストの特徴は、科学の歴史の中で行われてきた原子・分子の存在について、学習者が考察できるように、テキストのポイントごとに「考えてみよう」と題した部分を作成した点である。この部分では、実験や考察から、科学の知の転換を迫体験できるようにした。表1は作成したテキストの目次である。

表1 テキストの目次

| | |
|------|---------------------------------|
| 第1章 | ものは何からできているのか～科学の歴史をヒントに考えてみよう～ |
| (1) | 私たちは何からできているの？ |
| (2) | 古代ギリシャの考え方を学ぼう |
| (3) | 近世の考え方をヒントにしよう |
| (4) | 燃えるってなんだろう |
| (5) | 原子から分子へ |
| (6) | 熱と運動の関係について |
| 第2章 | 原子を見る実験～原子があることを証明してみよう～ |
| (1) | 原子をみつけるための準備 |
| (2) | 花粉の中の黒い粒子 |
| (3) | ブラウン運動の原因は何だろう |
| (4) | ブラウン運動の原因を探ろう！ |
| (5) | ペランの実験 |
| 第3章 | ブラウン運動の理論からアインシュタインの理論を見つめよう～ |
| (1) | 気体の法則を考えてみよう |
| (2) | 原子のモデルで考えてみよう |
| (3) | 落下の運動と空気抵抗 |
| (4) | アインシュタインの理論 |
| (5) | 式の比較からわかること |
| | おわりに |
| コラムⅠ | 古代ギリシャでの原子論の発展～エピクロスとストラトン～ |
| コラムⅡ | より良い理論とは、どんなものでしょうか |

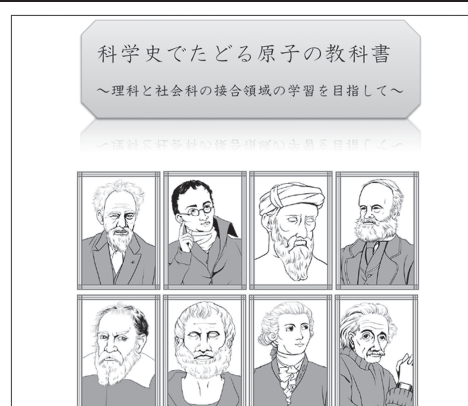


図3 教材の表紙

第1章では古代ギリシャの原子論から近代の化学での原子・分子について、第2章ではブラウンの発見から始まるブラウン運動の歴史について扱った。第3章ではペランの実験を説明するためのアインシュタインのモデルを気体の法則から取り扱った。

教材の具体的な例として、第2章のブラウン運動の発見の部分について紹介する。

イギリスの植物学者ロバート・ブラウンは、水中で花粉が黒い粒子を出すことを発見した。ブラウンは、当時、花粉は種の保存に関係するものであるということから、この黒い粒子が生命の元であると考えた。そして、この興味深い現象を様々な花粉について研究をした。その研究の最中、誤って傷つけた植物の種子以外の部分からも同様の黒い粒子が出ることを発見した。生命の元という仮説に疑問を抱いたブラウンは、この疑問を解決すべく、実験を行った。これらの実験について学習者に考察を促すように図4のような設問を入れた。

さらなる考察として、ブラウン運動は、無機物では起きないのかという疑問が生じる。また、黒い粒子が、生命の源でない場合、この現象をどのように説明することができるのだろうと学習者に問い、ブラウン運動の原因が、粒子とその溶媒間の関係であることを段階的に考えさせる。

考えてみよう④

有機物由来の粒子だとすれば、どのような実験をすればよいのか。

- ・まずは有機物から出るのかを確認する
- ・有機物だけの確認でいいのだろうか

図4 教材中の発問例

4. 結果

4. 1. 物理学実験における実験結果

平成26年度の本学の物理学実験（コンピュータの活用を含む。）（後期木曜日7,8,9限）において、開発したブラウン運動の実験教材を導入した。ここで、先行研究をもとに、スライドグラスとカバーグラスの間にシーリング材を用いる方法を当初は導入したが、学期の後半期間ではポリエチレンテープを用いる方法に改良した。また、平成27年度の物理学実験（コンピュータの活用を含む。）（後期木曜日7,8,9限）でもブラウン運動の実験を行っている。この実験ではポリエチレンテープを用いて測定を行っている。ポリエチレンテープを用いた実験では、シーリング材を使用したときに比べ、実験の精度の向上が確認できた。

4. 2. ポリエチレンシートの有効性

ブラウン粒子の移動する空間を作成するためにホール

スライドグラスを用いたり、スライドグラスとカバーグラスの間に、ロウやマニキュアなどを用いたりされている。しかし、これらには以下のような問題があることが、物理学実験の学生の様子からわかった。

- ・被写界深度中から粒子が移動しやすい
 - ・均一な厚さに塗ることができない
 - ・（マニキュアやシーリング材の）洗浄に手間がかかる
 - ・（マニキュアやシーリング材の）乾燥に時間がかかる
- 本研究では、スライドグラスとカバーグラスの間にポリエチレンテープを用いた。このポリエチレンテープを用いたことで、以下のことが改善された。
- ・被写界深度から移動する粒子が減少した
 - ・均一な厚さの空間をプレパラート上に作成ができた
 - ・プレパラートの作成や片付けが簡易化された

4. 3. 科学史教材について

作成した教材は、平成26年9月に本学の「新理数教育IV」の授業まとめである、「教科書研究発表会報告書」として発行した。また、その後、平成26年度に本学で開催された「青少年のための科学の祭典 奈良大会」において「目指せ！スーパーサイエンスティーチャー」の発表の一部として、改訂版を配布した。図表を含め、内容は全てオリジナルのテキストであることから、インターネット上で公開することを検討している。

5. 考察

本研究ではより観察がしやすい方法として、ポリエチレンテープを用いた。このポリエチレンテープは、シクなどの表面保護に用いられているもので、インターネット等を通じて購入することができる。従来の観察方法よりも簡便な方法であり測定精度の向上に寄与すると考えられる。

学校教育にブラウン運動を導入するにあたり、実験の時間、コストなどが問題となるだろう。

実験時間については、物理学実験での実践の結果、実験の準備、観察、解析、計算などをすべて含めると、3時間程度かかった。また、対象が大学生であるため、同様の実験を中学生や高校生が再現できるとは限らない。実験の難易度を適切化する工夫が必要であることが分かった。

次に実験のコストについては、本実験ではカメラと顕微鏡が一体になっているものを使用した。このような機材は一般的な学校にはないものと考えられる。青木・柴崎はCCDカメラを顕微鏡の鏡筒に差し込む装置を用いていた。また、顕微鏡に一眼レフカメラを連結する装置による観測なども行われている。どの装置にしても、高額の費用が掛かることが予想される。また、測定に用い

たラテックスビーズも、一瓶数千円かかる。この点を踏まえて、学校に実験を導入する際は、既存の顕微鏡で実験できる方法や、粒子などを工夫する必要がある。

6. 今後の展望

ブラウン運動の実験を学校現場で実践するためには、時間とコスト面での調整が不可欠であり、これらが今後の本研究の中心的な課題である。現段階では、以下のことを検討している。

6. 1. ブラウン運動の実験教材の改良

低コストでのブラウン運動の教材を作成するために、タブレット PC を使用した実験方法とデジタルカメラを使用した方法を検討中である。

タブレット PC を使用した方法では、スマートフォン顕微鏡などを使用する。この方法では、近年学校現場に導入されてきたタブレット PC を用いることができるため、比較的簡単かつ安価で実験が行えると考えられる。

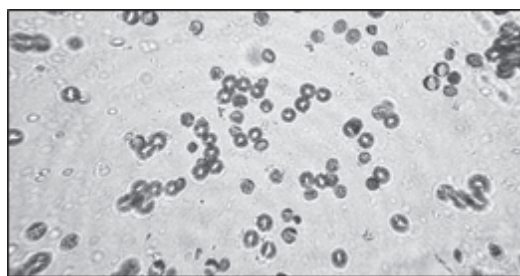


図5 スマートフォン顕微鏡での写真
(iPad mini2のフロントカメラにLeye^(注1)を装着して花粉を撮影した)

この方法での予備実験として撮影したものが図5である。

この予備実験では花粉を用いたが、膨潤の様子を観察するのが精いっぱいであった。スマートフォン顕微鏡では100倍程度と、ブラウン運動を観察するには厳しい倍率となっている。しかし、生徒一人に一台のタブレットが支給されている学校などもあるほど、タブレットの導入が進んでいる。このような、タブレットを利用した方法では、コスト面の問題を解決することができるため、この方法の検討を急ぎたい。

デジタルカメラで直接顕微鏡の視野を撮影する方法では、学校に既存の顕微鏡とデジタルカメラ等を用いて活動できるため、安価な方法だといえる。この方法についても予備実験を行っている。スタンドに、デジタルカメラを固定する台座を取り付け、直接顕微鏡の視野を撮影した。その予備実験の結果が次の図6である。

理科教材としても、デジタルカメラと顕微鏡を固定するパーツが販売されているので、これについても検討をしたい。

動画を撮影する方法を2つ検討しているが、このどちらも従前の方法より低コストで実験をすることができるだろう。これらの方法について検討を重ね、学校で導入できる教材を作成したい。

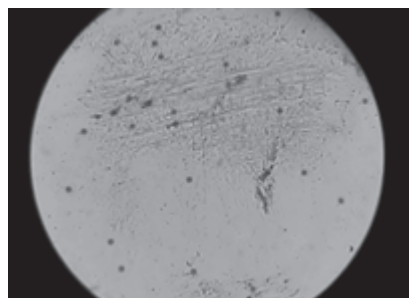


図6 顕微鏡の視野をデジタルカメラで撮影（画面の粒子は3.15 μm）

6. 2. 科学史教材の実証

本研究で作成したテキストを使用して、中学生や高校生に対して授業を実践する予定である。実践を通じて、テキストや、実験教材の有効性を確認する。

7. まとめ

本研究ではブラウン運動の実験教材とその理解を促進するための科学史教材を作成した。ブラウン運動の教材では、従来よりも比較的簡単なプレパラートの作成をすることができた。また、科学史教材では、原子・分子に関係する科学史を紹介するとともに、学習者が原子・分子の存在について考えることができる教材を作成した。この教材を用いた実践が生徒にどのように原子・分子の認識を促進するのか検証を進めていきたい。

謝辞

科学史教材を作成するにあたって、聖心女子大学の伊豆藏好美先生には大変お世話になった。平成25年度新理数教育IV教科書研究発表会では、先生方から大変有意義な意見をいただくことができた。また、物理学実験（コンピュータの活用を含む。）の平成26年、27年の受講者からブラウン運動実験に対して、体験を通じた意見をいただいた。この研究に関わった皆様に心より感謝申し上げる。

注

(1) テラベース株式会社が製造・販売をしている、スマートフォン フロントカメラで使う顕微鏡の名称

参考文献

- 青木健一郎、柴崎彬（2006）、「ブラウン運動観測の学生実験について」、慶應義塾大学日吉紀要.自然科学、No.39、慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会、p.21-52
- 江沢洋（1976）だれが原子を見たか、岩波書店
- 米沢富美子、（1986）、ブラウン運動、共立出版
- 文部科学省（2009）、中学校学習指導要領解説 理科編、大日本図書
- 文部科学省（2010）、高等学校学習指導要領解説 理数編 理科編、実教出版
- 福島いずみ、芝原寛泰（2001）、「小学校理科授業における粒子概念の導入の新しい試み」、京都教育大学実践研究紀要、第1号、京都教育大学附属教育実践センター機構教育支援センター、p.67-80
- 福島いずみ、芝原寛泰（1999）、「ブラウン運動の簡単な観察法」、フォーラム理科教育、京都教育大学理学科内「フォーラム理科教育」研究会、No.1、p.49-54
- 高橋哲郎（1985）教師のための科学史教育入門、新生出版
- 村上祐、（2010）「小・中理科における望ましい粒子概念教育の提言―国の調査結果の背景および独自調査の分析から―」、岩手大学教育学部研究年報 第69巻 pp.73-87