

粒子像は圧力概念の形成に貢献できるか

—小学校理科における事例研究—

土井 徹

粒子像は圧力概念の形成に貢献できるか

—小学校理科における事例研究—

土井 徹

Whether the Particulate Picture can Contribute to the Construction of the Pressure Concept?

—Case Study in Elementary School Science—

Toru DOI

キーワード：粒子像，圧力，小学校

Keywords：particulate picture, pressure, elementary school

I. 研究の背景と目的

粒子像は、子どもたちが科学を学ぶ上で、様々な学習場面において適用可能な不可欠の基本的アイデアである。現行の小学校および中学校学習指導要領解説理科編（平成20年改訂）、そして高等学校学習指導要領解説理科編（平成21年改訂）では、4つの科学の基本的な見方や概念の柱が示されているが、「粒子」がその1つであることは、このことを踏まえてのことであろう。しかしながら、小学校理科で粒子像を用いて自然現象を説明することは、学習指導要領には明記されておらず、したがって、現在、わが国の小学校では、そのような学習は積極的に行われていないと考えてよいだろう。

一方で、小学校段階での粒子像の導入についての提案や実践研究は、これまでに多数行われてきている。

例えば、葉山ら（2006）は、小学校4～6年生234名を対象とした調査から、小学校理科への粒子像導入の可能性を指摘し、児童の液体・気体に対する粒子像を引き出すための教師の「介入」方法の検討が必要であると述べている。さらに、「何をどの程度まで」導入するかを明らかにした上で、カリキュラムの再編成を行うことにも言及している。カリキュラム編成については、菊地ら（2008）の研究がある。菊地ら（2008）は、粒子像に関する先行研究と中学校2年生から高校3年生までの468名を対象に行った自らの調査結果を踏まえて、小学校から高校までの、粒子像を基軸にした物質学習のカリキュラム構成案を提案している。提案のポイントは、粒子像の小学校段階での導入と、その後の学習における粒子像の積極的な活用である。杉本・神林（2006）も、「物質概念においては、高等学校で物質の化学変化や構造の概念、モル概念の獲得を目指し、そのために中学校・小学

校の段階で獲得すべき概念が各カリキュラムとして挙げられるのが理想であろう。最終的な概念獲得を目指し、溶解現象を扱う上でより深い理解を促すためには、小学校の段階でも、もっと積極的に粒子概念を取り上げ、学習内容の中で取り扱うべきであると考え」と、同様の主張をしている。

それでは、実際に粒子像を小学校の授業に導入すると、児童の学習にどのような影響を与えるのだろうか。実践研究の例を見てみる。表1に示した先行研究では、小学校段階で粒子像を導入することで、児童はそれを用いて事象を適切に説明するようになったり、学習内容の理解が促進されたりといった学習効果が報告されている。また、量が膨大なため本稿では一つひとつを取り上げることにはしないが、理科教育に関する学会発表においても、同様の報告が多数行われてきている。

一方で、坂本ら（2008）や村上ら（2014）は、粒子像を用いて溶解の学習を行った場合、小学生も中学生も、「溶質の粒は時間が経つと下に沈む」と考えることがあると報告している。この考えは、Doran（1972）が同定した粒子像に関する小学生の6つの誤概念のうち、「物質の粒子は動かない」と関連するものであり、カリキュラム編成上の今後の検討課題である。また、後藤（2011）の指摘についても検討を要する。後藤（2011）は、系統性を踏まえた「粒子」に関する指導について懸念を表明している。それは、現行の学習指導要領において「粒子」が柱の一つとなったことから、小学校の教員が「粒子で説明しなければならないのでは」と思い込む可能性があり、粒子像そのものを指導し、表層的にわかったつもりにさせてしまうことである。また、仮にそういうことが起これば、系統的に学ぶことで中学校あるいは高校といった先の段階で味わうであろう、知らなかったこと

表1 粒子像を授業に導入した実践研究

研究テーマ, 著者	知見
小学生の溶解認識における概念変容の研究 宗近 (2002)	小学校5年生の「溶解」の授業に粒子モデルを導入すると、視覚を通して実感することができない溶液の均一性や濃度の違いといった溶解の状態をイメージしやすくなる。粒子を用いることにより溶解現象のモデル化が容易になる。
「温度による空気の体積変化」の理解に関する一考察 - 粒子概念を用いた授業実践を通して - 源田・西村 (2008)	小学校4年生に、へこんだボールを温めると膨らむ理由について議論させた後、ボールの中の空気の様子を粒子モデルで説明したアニメーションを見せ、その効果を検証した。その結果、4年生が適切な粒子概念を獲得することは難しいが、空気を粒子で表して、粒子の動きによってボールが膨らむと表現できるようになることが明らかとなった。
小学校5・6年の溶解の学習に一貫して粒子モデルを用いた効果 山下・小野寺 (2009)	小学校5,6年生で一貫して粒子モデルを用いて学ぶことにより、粒子モデルの活用が促され、 ・水と二酸化炭素を入れたペットボトルに蓋をして振るとへこむ理由 ・ペットボトルを振る前の水と振った後の“水”の体積と重さの相違を、より適切に説明できるようになることが明らかとなった。
小学校における初歩的粒子概念導入の試み—イメージ図作成の授業実践から— 増田 (2011)	小学校4年生に、「注射器に閉じ込めた水と空気に圧力をかけたとき」、「水や空気があたためられたとき」、「水が沸騰する前後」、小学校5年生に、「ものが水に溶けたとき」、「溶けたものが析出したとき」の様子のイメージ図を描かせると、粒子像を使って表現する児童がおり、それを真似て粒子像を使う児童も増える。理解度調査問題の回答結果からは、粒子概念を獲得しつつある4年生は、水蒸気と湯気について適切に理解していることがわかった。
小学校における系統的物質学習の実践的研究—粒子概念を「状態変化」で導入し「溶解」で活用する授業— 菊地ほか (2014)	小学校4年「水と水蒸気」の学習で粒子概念を導入し、その後、5年「もののとけ方」で粒子概念を活用する授業を行った。その結果、子どもたちは粒がばらばらになると見えなくなるという「水と水蒸気」で得た知識を用いて溶媒が見えなくなることを説明したり、質量保存を適切に理解したりすることが明らかとなった。

を知る喜び、仕組みがよりわかる驚きや発見、「こう考えるとよりわかるようになる」という学ぶ喜びを奪うことになると同時に、取り返しのつかない誤概念を植え付けはしないかという懸念である。

以上で示したように、小学校理科での粒子像の導入は、学習効果が期待されると同時に検討課題も有している。導入を仮定した場合、中学校以降の学習とのつながりを勘案して、「どの学習において、どの程度まで扱うのか」について、引き続き検討が求められ、そのためには、小学生は、どの学習場面において、どの程度のことがわかるかについて、より多くの情報が必要となる。また、菊地ら (2014) の報告にあるような、「獲得した粒子に関する知識」を別の学習場面で有効に活用できるか否かについての研究成果を蓄積することも必要である。ところが、これまでに小学生を対象に行われた実践研究は、そのほとんどが「溶解」と「温度による空気や水の体積変化」の学習に関するものであり、それ以外の学習についての研究報告はごく少数である。また、獲得した粒子像に関する知識の活用についての研究は極めて少ない。そこで本研究では、これまでに報告例のない、圧力に関連する学習場面で、小学生は既習の粒子像に関する知識をどの程度活用することができるかについて、実践的に検討を行った。

なお、本稿では、引用文献において「粒子像」以外の

言葉が用いられている場合には、原文に従い、基本的には「粒子像」という語を用いることとする。本稿で用いる「粒子像」という語は、他の研究報告で使用されている「粒子概念」、「粒子モデル」、「粒」、「粒子」を包括するものである。

II. 研究の方法

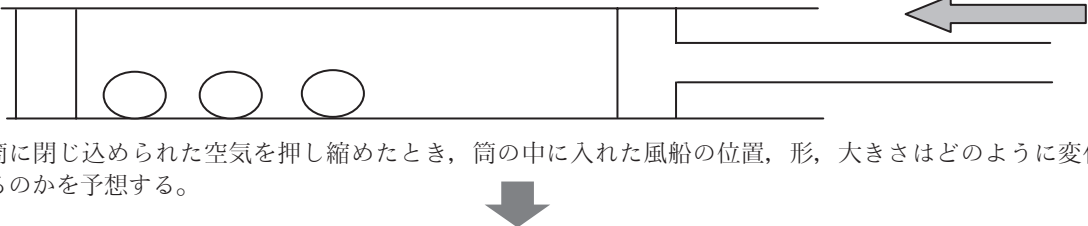
1. 調査時期

2015年10月

2. 調査対象

広島県内の小学校6年生2学級(合計77名)を対象として実施した。この児童は4年生時(2013年度)に、教師から「すべての物質は、粒子(つぶ)でできている」、「粒子はこれ以上小さくならない」という教示を受けた後、複数の空気に関する現象について説明した経験を有している。その際に、半数の児童は教師の説明を聞きながら考え(以下、A群と示す)、残り半数の児童は教師の説明を受けずに各自あるいは数名で考えている(以下、B群と示す)。4年生時の授業内容の詳細は表2に示したとおりである。

表2 4年生時の授業内容

時	A 群	B 群
1	「すべての物質は、粒子（つぶ）でできている」、「粒子はこれ以上小さくならない」という教示を受ける。	
2 3 4 5	閉じ込めた空気を加圧した際の空気の粒のふるまいについて、「物質を構成している粒子は動いている」ことを教師が児童に紹介することを経て、空気は加圧すると体積が小さくなることを、粒子像を用いて表現する。	閉じ込めた空気を加圧した際の空気の粒のふるまいについて、教師による説明を受けずに、児童が各自あるいは数名で考えて、空気は加圧すると体積が小さくなることを、粒子像を用いて表現する。
6	閉じ込めた空気を加圧した際、粒子が動ける範囲が狭くなり、粒子が周囲にぶつかる回数が増えて、空気鉄砲の玉が飛んだり、注射器のピストンが押し返されたりするという教師の説明を聞く。	
7 8	加熱による空気の膨張について、「空気を熱すると空気の粒子は運動が活発になる」ことを教師が児童に紹介することを経て、空気は温めると体積が大きくなることを、粒子像を用いて表現する。	加熱による空気の膨張について、教師による説明を受けずに、児童が各自あるいは数名で考えて、空気は温めると体積が大きくなることを、粒子像を用いて表現する。
9	 <p>筒に閉じ込められた空気を押し縮めたとき、筒の中に入れた風船の位置、形、大きさはどのように変化するかを予想する。</p> <p>↓</p> <p>予想を確かめる実験を行った後、教師による説明を受けずに、児童が各自あるいは数名で考えて、「なぜそうなるのか」を、粒子像を用いて表現する。</p>	

第1～8時は、2013年10～12月に実施した。第9時は、2014年2月に実施した。

なお、第1時～第8時までの授業内容は、古瀬（2013）より引用し、表記の一部を改変している。

なお、対象児童は、4年生時以外には、粒子像に関する教示を受けていない。また、粒子像を用いて自然現象を説明することを求められる経験は、4年生時と今回の調査を除いて有していない。なお、対象児童は、5年に進級した2014年4月に学級替えが行われたため、6年時には2学級とも、A群とB群の児童がそれぞれ半数程度存在している。

3. 調査方法と実践の概要

小学校6年「水溶液の性質」の学習のうち、「気体が溶けている水溶液」（全2時間）で授業および調査を実施した。授業を行ったのは筆者である。第1時では、炭酸水には二酸化炭素が溶けていることを、実験によって確かめた。第2時では、容量900mLの透明なペットボトルに水を1/2程度入れた後、二酸化炭素ポンプを用いて二酸化炭素を注入し、蓋を閉めて振るとペットボトルが凹む現象を見せた。次に、二酸化炭素は水に溶けやすい気体であることを教師が児童に伝えた後、ペットボトルが凹んだ理由を図と文で表現するように促した。課題は「ペットボトルに半分ほど水を入れ、二酸化炭素をふきこんで、ふたをした後、ペットボトルをよくふると、ペットボトルがへこみました。その理由をわかりやすく説明しなさい」とした。

4. 分析の手順

児童が表現した「ペットボトルが凹んだ理由」を、ペットボトル内外の圧力の差が図または文で明記されているか否かによってグループ分けし、圧力に関する学習場面で、小学生は既習の粒子像に関する知識をどの程度活用することができるかについて検討した。次に、A群とB群の圧力差を明記した児童の人数を比較し（表3）、4年時の授業内容の相違が与える影響を検討した。

Ⅲ. 結果

表3 ペットボトルが凹む理由

	ペットボトル内外の 圧力差を明記	ペットボトル内外の 圧力差 記述なし
A 群	15	24
B 群	15	23
合計	30	47

ペットボトルが凹む理由についての児童の表現事例を図1～6に示す。図1, 2, 3は、ペットボトル内外の圧力差を明記した児童の表現事例であり、図4, 5, 6は、圧力差の記述がなかった事例である。

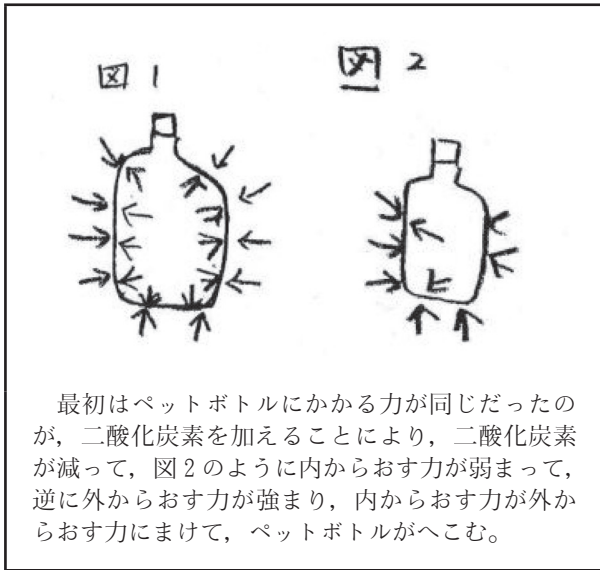


図1 気圧や圧力差を明記した事例1

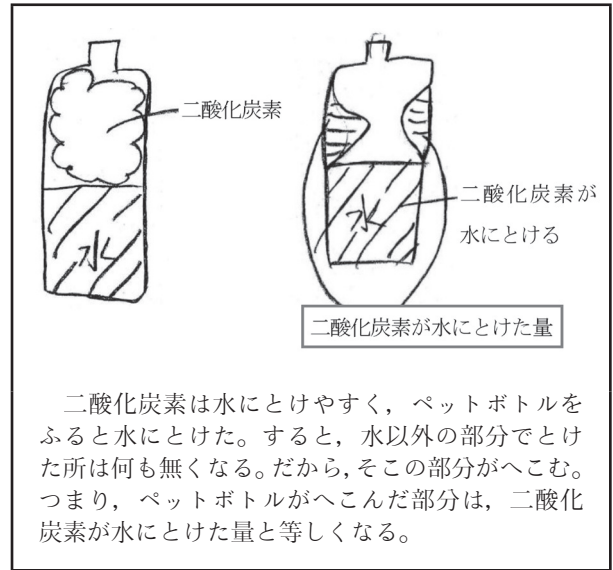


図4 気圧や圧力差の記述がなかった事例1

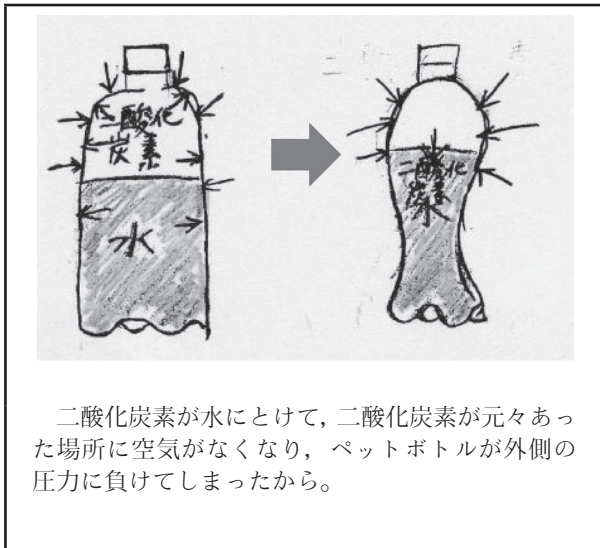


図2 気圧や圧力差を明記した事例2

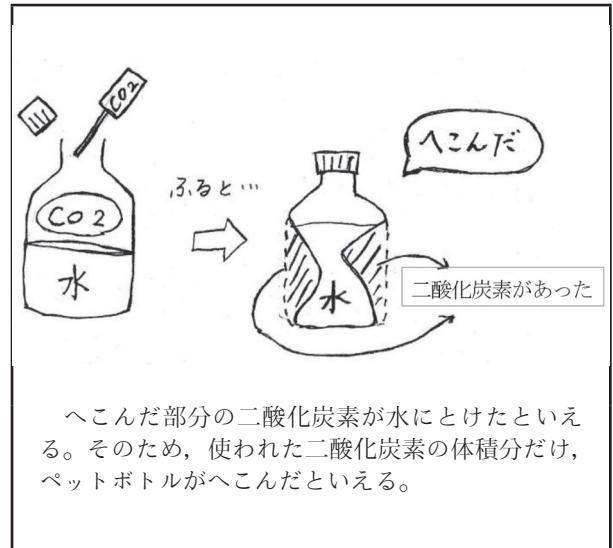


図5 気圧や圧力差の記述がなかった事例2

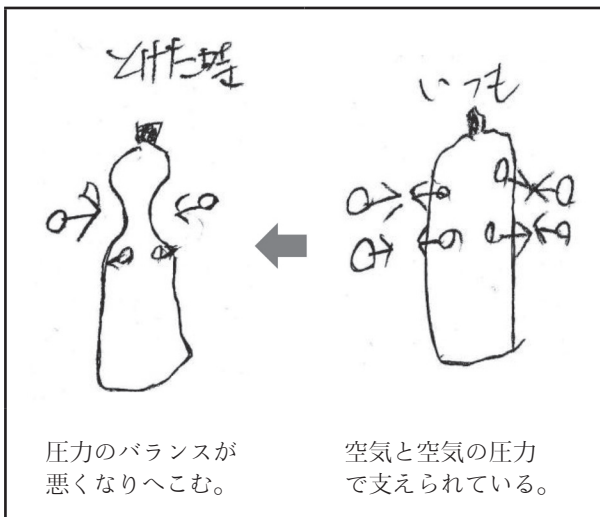


図3 気圧や圧力差を明記した事例3

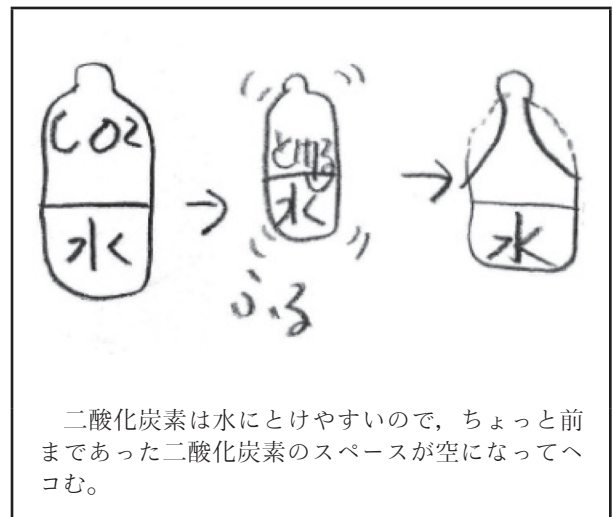


図6 気圧や圧力差の記述がなかった事例3

表3は、ペットボトル内外の圧力差を明記した児童と記述がなかった児童の人数分布を示したものである。ペットボトルが凹む理由について、気圧の存在やペットボトル内外の圧力差を明記した児童は38%、気圧や圧力差の記述がなかった児童は62%であった。また、A群とB群の回答に有意な差は確認されなかった。

IV. 考察

まず、調査対象児童が、既習の粒子像に関する知識をどの程度活用することができたかについて検討する。

今回の授業で取り上げた、水と二酸化炭素を封入したペットボトルを振ると凹む現象は、小学校6年の理科教科書では各社とも掲載している。したがって、一般的に行われている活動だと考えて差支えないだろう。しかしながら、この活動のねらいは、二酸化炭素が水に溶けることを確かめることであり、「なぜペットボトルが凹むのか」について考えることは発展的な扱いとなる。ペットボトルが凹んだ理由を表現させた場合には、「ペットボトルをふると、上にあった二酸化炭素が下にあった水のつぶにくっついて、その上にあった二酸化炭素がなくなったからへこんだ」(山下・小野寺, 2009)と表現するのが一般的である。なぜなら、小学校では、「ペットボトルが凹まないのはペットボトル内外の気体による圧力が平衡状態にあるからだ」ということは学習しないからである。このことは、小学校4年で学習する「空気鉄砲の後玉を押したら、後玉が前玉に当たらないのに前玉が飛び出す」現象や、「栓をしたフラスコを温めたら栓が飛び出す」現象の扱いでも同様である。どちらも、容器内の空気のみに着目して、「閉じ込めた空気を押すと体積は小さくなり、小さくなった空気はもとの体積に戻ろうとする」、「空気は温めると体積が大きくなる」という説明している。もしも、空気を「運動する粒子」と見なせば、前玉や栓が静止しているのは、前玉や栓に反対方向から空気の粒子が同じ程度に衝突しているから静止しているのであり、前玉や栓が飛び出すのは、そのバランスが崩れるからという説明が可能であるが、小学校段階では時期尚早との判断であろう。

しかしながら、今回の調査では、教師の介入は一切行わなかったにもかかわらず、38%の児童がペットボトル内外の圧力差を明記して、ペットボトルが凹んだ理由を表現している。このような事例は、過去に報告がない。ペットボトル内外の圧力差を明記した児童の一部に、回答理由についてインタビューしたところ、4年時に学習したことを使って説明できると思ったからとの返答があった。このことからしても、既習の粒子像に関する知識が2年後の学習に活用されたと判断して間違いはないであろう。粒の運動性は現象の説明を深めるために重要な要素である(菊地ほか, 2014)。菊地ほか(2014)は、小学校段階でも粒子の運動性を取り入れた授業を行うべきかどうかを、粒の運動性を盛り込んだ授業の実践結果

によって判断することが必要であるとの指摘をしているが、今回の調査結果は、小学校段階で粒子の運動性を取り入れた授業を行うことの可能性を示すものといえる。

また、今回の一連の学習を、仮に小学校理科のカリキュラムに位置付けたとすれば、中学校理科との円滑な接続も期待できる。中学校理科では、1年で浮力や大気圧について学習する。浮力では、物体の上面と下面にはたらく水圧の差によって生じる上向きの力が浮力であることや、物体にはたらく重力よりも浮力のほうが大きければ、物体は水に浮く(塚田・大矢ほか, 2016a)ことを学ぶ。この学習は力学的平衡に関する学習であるが、今回の事例研究で扱ったペットボトルが凹む現象も力学的平衡に関連するものである。したがって、今回の一連の学習を小学校段階で行っておくことで、中学校での浮力の学習についての理解が促進されることが期待される。大気圧の学習では、高山の山頂で中身が空のペットボトルに蓋をして麓まで持って下りるとつぶれる理由を考える活動が掲載されている(塚田・大矢ほか, 2016a)。ペットボトルが凹むという現象は今回の実践で扱った現象と全く同じであり、かつ、その理由はペットボトル内外の気体の粒子の衝突の頻度によるもので、双方とも同じである。したがって、今回の実践で行った「なぜペットボトルが凹むのか」を考える学習経験がそのまま活用されることが大いに期待できる。

3年では、力のつり合いの学習がある。物体が動かないための条件として、物体にはたらく力がつり合っていること(塚田・大矢ほか, 2016b)、重力と垂直抗力などを例に作用・反作用の法則について学ぶが、この学習も、力学的平衡という観点では、今回の一連の学習と関連するものである。したがって、浮力の学習の場合と同様に、獲得した知識が理解を促進することが期待される。

以上で述べてきたように、今回の調査結果と中学校以降の学習とのつながりを勘案すれば、小学校段階で気体の粒子の運動性を盛り込んだ授業を行うことは不可能ではないし、中学校での学習効果も期待できるといえよう。

次に、4年時の授業内容の相違が6年時の学習に与える影響を見てみる。先に述べたように、「なぜペットボトルが凹むのか」の理由としてペットボトル内外の圧力差を明記したA群とB群の児童の人数は、ほぼ同数である。したがって、今回行った4年時の一連の授業において、教師から「物質を構成している粒子は動いている」、「空気を熱すると空気の粒子は運動が活発になる」との教示を行わなくても、2年後の学習には影響を与えないといえる。このことは、増田(2011)の調査結果と整合するものであり、粒子像に関して、どの学習場面で児童に何を教示するのかについては、引き続き実践的な検討が必要であろう。

V. おわりに

小学校段階で気体の粒子の運動性を盛り込んだ実践研究はこれまでに報告がなかったが、今回の事例研究から、運動する粒子像を小学校段階で導入することは可能であり、それが圧力概念の形成に貢献する可能性が指摘された。また、小学校4年時に獲得した粒子像に関する知識が、2年後の別の学習場面で4割程度の児童に有効に活用されたことを報告した。

欧米の初等科学教育のテキストを見ると（例えばWilliam, B., Douglas, C. and James, F. et al. 2007a.）, 物質の状態変化が、粒子の運動性を用いて図示されていることは決して珍しいことではなく、前期中等科学教育のテキスト（例えばJames, T., Rita, A, C. and Kenneth, C, et al. 2007.）にも、同様の図が掲載されている。おそらくは双方の学習の円滑な接続を意図するものであろう。

今回の研究結果から考えれば、我が国の小学校段階においても、気体の粒子の運動性を授業に導入することは決して不可能なことではない。したがって、中学校の学習との円滑な接続を勘案しながら、気体の粒子の運動性を授業に導入することを引き続き検討することは有意義であろう。今回は、粒子の運動性と圧力概念との関連に焦点を当てて研究を行ったが、化学変化など他の学習との関連についても、研究の蓄積が望まれる。

他方、筆者の別の調査（土井, 2016）では、小学校4年生に「全てのものは小さな粒でできている」という教示を行った後、空気に関する現象を説明させることを繰り返すと、徐々に粒子概念を用いて説明できるようになること、およびその説明は適切であったり適切でなかったりすることが確認されている。また、今回の調査では、ペットボトルが凹む理由について、38%の児童は気圧の存在やペットボトル内外の圧力差を明記したが、62%の児童は記述しなかった。つまり、小学校段階で気体の粒子の運動性を盛り込んだ授業を行うことは不可能ではないが、全ての児童に理解を促し、獲得した知識を全ての児童が常に適切に活用できるとはいえないということである。義務教育段階における理科教育は全ての児童・生徒のために行われることを考えたとき、引き続き、慎重な検討が必要である。

付記

本研究は、平成27年度日本理科教育学会中国支部大会で発表したものを大幅に加筆・修正したものである。

引用・参考文献

有馬朗人・小林誠ほか41名：新版たのしい理科6年、大日本図書、102、2015。
土井徹：円滑な学びのつながりをめざす小学校・中学校の理科指導方略の研究、広島大学博士学位論文、70 - 73、2016。

Doran, R.L. : Misconception of selected science concepts held by elementary school students. *Journal of Research in Science Teaching*, 9(2), 127-137, 1972.
古瀬健太郎：粒子の保存性に関する教示の必要性－第4学年理科授業の実践から－、平成25年度教育研究初等教育、広島大学附属東雲小学校、82-87、2013。
源田智子・西村侑子：「温度による空気の体積変化」の理解に関する一考察－粒子概念を用いた授業実践を通して－、山口大学教育学部研究論叢、58、51 - 66、2008。
後藤顕一：系統性を踏まえた「粒子」に関する学習指導について－TIMSS2007酸化還元に関する問題の回答分析から－、理科の教育、60(8)、9-12、2011。
葉山優・小嶋美也子・勝呂創太・圓谷秀雄・金田知之・下條隆嗣：小学校理科への物質の粒子像導入の可能性－児童のもつ粒子像についての調査－、東京学芸大学紀要自然科学系、58、15 - 39、2006。
石浦章一・鎌田正裕ほか54名：わくわく理科6、新興出版社啓林館、90、2014。
James, T., Rita, A, C. and Kenneth, C, et al. : Matter and Energy, McDougal Littell, A29- A 34, 2007。
菊地洋一・高室敬・尾崎尚子・黄川田泰幸・村上祐：小学校における系統的物質学習の実践的研究－粒子概念を「状態変化」で導入し「溶解」で活用する授業－、理科教育学研究、54(3)、335 - 345、2014。
菊地洋一・武井隆明・三田正巳・高橋治・村上祐：粒子概念の位置づけと物質学習カリキュラム、理科教育学研究、49(1)、35 - 51、2008。
増田伸江：小学校における初歩的粒子概念導入の試み－イメージ図作成の授業実践から－、お茶の水女子大学附属小学校研究紀要、18、63 - 77、2011。
文部科学省：小学校学習指導要領解説理科編、大日本図書、2 - 17、2008a。
文部科学省：中学校学習指導要領解説理科編、大日本図書、3 - 15、2008b。
文部科学省：高等学校学習指導要領解説理科編理数編、実教出版、3 - 11、2009。
毛利衛・黒田玲子ほか32名：新編新しい理科6年、東京書籍、151-152、2015。
宗近秀夫：小学生の溶解認識における概念変容の研究、理科教育学研究、43(2)、1 - 12、2002。
坂本有希、菊地洋一、武井隆明、村上祐、塚野弘明：溶解現象を粒子の運動で理解する授業実践、第58回日本理科教育学会全国大会要項、300、2008。
霜田光一・森本信也ほか34名：みんなと学ぶ小学校理科6年、学校図書、152、2015。
杉本良一・神林久美子：理科学習における子どもの水溶液概念獲得に関する研究－小学校理科「もの」とけ方」における学習の検討－、鳥取大学地域学部紀要、地域学論集、3(2)、203 - 237、2006。

粒子像は圧力概念の形成に貢献できるか

塚田捷・大矢禎一ほか 60 名:未来へ広がるサイエンス 1,
新興出版社啓林館, 222 - 225, 2016a.

塚田捷・大矢禎一ほか 60 名:未来へ広がるサイエンス 3,
新興出版社啓林館, 140 - 145, pp.169 - 171, 2016b.

山下修一・小野寺千恵:小学校 5・6 年の溶解の学習に
一貫して粒子モデルを用いた効果, 理科教育学研究,
50(1), 85 - 92, 2009.

養老孟司・角屋重樹ほか 27 名:未来をひらく小学理科 6,
教育出版, 128, 2015.

William, B., Douglas, C. and James, F. et al. :
HOUGHTON MIFFLIN Science,Houghton
Mifflin, E52, 2007a.

William, B., Douglas, C. and James, F. et al. :
HOUGHTON MIFFLIN Science Florida, Houghton
Mifflin, E8 - E9, 2007b.

(2016年 8 月 29 日受付)

(2016年 10 月 5 日受理)