

論文

水溶液中の粒子の均一性に関わる概念形成を促す教材の開発と その評価

—小学校第5学年理科「物の溶け方」での活用を志向して—

澤柿 教淳・中村 綾友・鼎 裕憲

The Development and Evaluation of Teaching Materials to Promote Concept Formation
Related to the Homogeneity of Particles in Aqueous Solutions:
Toward Their Use in the Fifth Grade Elementary School Science Class "Melting of Objects"

SAWAGAKI Kyojun, NAKAMURA Ayu and KANAE Hironori

要 旨

本研究の目的の第一は、水溶液中の粒子の均一性に関する概念形成を促す教材を開発すること、目的の第二は、開発した教材が具備する特徴を評価すること、目的の第三は、本教材を活用した授業デザインを提案することである。

結果、容器内の任意の位置で複数の階層を設置できる教材「複数段可動式析出観察器」を開発した。この教材が具備する特徴を評価した結果、本教材にはコンフリクトの自立的な生成を促す3つの特徴が具備されていることが確かめられた。さらに、本教材を用いた授業デザインを構想した結果、コンフリクトが自立的に生成・解消される局面を想定することができることが示された。

これまで水溶液中の粒子の均一性について明示的に学ぶ教材はほとんどなく、今後の教授方略の向上に寄与できると期待できる。今後は、本教材を実際の授業で運用し、実践的に検討することが課題である。

キーワード

教材開発 授業デザイン 粒子の均一性 物の溶け方 塩化アンモニウム

目 次

- I. 研究の背景と問題の所在
 - II. 研究の目的
 - III. 研究の方法
 - IV. 研究の結果と考察
 - V. 研究のまとめ
- 附記
註釈
引用文献

I. 研究の背景と問題の所在

1. 水溶液中の粒子の均一性に関わる誤概念

小学校第5学年理科では、水溶液中の粒子の均一性に関わる単元「A(1)物の溶け方」が設けられている。平成29年度学習指導要領理科編の内容ア¹⁾には以下のように示されている。

(ア)物が水に溶けても、水と物とを合わせた重さは変わらないこと。

物が水に溶ける量には、限度があること。

(ウ)物が水に溶ける量は水の温度や量、溶ける物によって違うこと。また、この性質を利用して、溶けている物を取り出すことができること。

本単元については、内容区分「A物質・エネルギー」において、「粒子」といった科学の基本的な概念等を柱として内容の系統性が図られている²⁾。具体的には、本単元は第3学年の単元「A(1)物と重さ」における「粒子の保存性」に関わる学習を踏まえているとともに、第6学年の単元「A(2)水溶液の性質」における「粒子の存在」や「粒子の結合」の学習へとつながるとされる^{註1)}。

坂本・菊地・武井・村上(2016)³⁾は、溶解現象に関する生徒の素朴概念について中学校第1学年160名を対象に調査した。その結果、「砂糖が完全に溶けて水全体の濃さが一様になった後、しばらく放置するとどうなるか」の質問に対して、「ア：粒子モデルが広がったまま」と正答を選択したのは28%であったのに対し、「ウ：粒子モデルが下層に移動する」と誤った回答をした生徒は64%と最高率であったことを報告している^{註2)}。また、選択理由をみると「みそ汁や紅茶の場合、時間が経つと粒が下に沈んでいるから。」「地球には重力があるから、物が下に移動するのは当たり前だから。」「見えなくても粒なら、下の方に沈殿するのではないかと考えたから。」等であった。この結果からは、水溶液の均一性について誤った認識をもつ生徒が一定数いるということがわかる。

この点にかかわる具体的な指導のあり方については、例えば平成29年度学習指導要領理科編では「物が溶けるということ、図や絵などを用いて表現」すること等を挙げている⁴⁾。ただ、これについて村

上(2009)⁵⁾は、「指導要領の中では『粒子』に直接言及してはいないものの(略)、何らかの『粒子イメージ』、『粒子モデル』を導入する必要がある。しかし、どのような『粒子イメージ』あるいは『粒子モデル』が適切かは記入していない」と指摘している。実際に小学校理科教科書の調査を行った土佐・野島・廣野(2020)⁶⁾は、「粒子モデルの導入は視覚化によって子どもの概念理解を促す利点がある一方で、粒子数や表現方法による制限によって、誤概念を生じてしまうかもしれないという懸念がある」ことを明らかにした。さらに、「教科書に記載されている粒子モデル図のもう1つの課題点として、図が静的であること⁷⁾」と指摘する。

以上のように、教科書の中では水に溶けた物質が液全体に広がっていくという表現がみられたり、授業の中で粒子のイメージを視覚化することを提言したりしているものの、そもそも、水溶液中の粒子の均一性に結びつく適切な観察・実験のあり方については、今後さらに検討する必要があるといえる。

2. 水溶液中の粒子の均一性に関わる指導上の課題

国立教育政策研究所(2006)⁸⁾は、「『観察』が学習の重要な要素となる単元においては、時間を確保し、じっくり観察できる場を設定することが大切である」とし、とりわけ、物が溶ける現象に関する指導上の改善については、「児童が物の溶ける現象を観察する際の視点について、教師の提示や助言の工夫を工夫する必要がある」、「食塩が水に溶けるという現象の理解を充実させるため、その変化の過程を観察し、児童一人一人に、観察事実を図や文で表現させるようにすることが重要である」と記載する。水溶液中の現象を図や絵で表現することはもとより、そもそも溶解現象を視覚的にとらえられるような観察・実験を工夫することが、指導上重要なことであると考えられる。

まず、水溶液中の現象を図や絵で表現することに関しては、齋藤・小野瀬・鈴木(2014)⁹⁾が、国立大学附属中学校第2学年4クラスを対象にICT機器を利用した動画モデル作成ならびに発表による思考の外化を図る活動を行っている。その結果、「動画は経時変化を表現できるため、一つの物体に着目し、

それを始めから終わりまで一つの画面上で追跡することで、一連のストーリーとして表現することができる」と報告している。このことから、動画モデルによる視覚化によって、粒子は水溶液中でバラバラに広がって存在しているという理解を促すことができると考えられる。また、奥(2019)¹⁰⁾は、一つの物質だけでなく様々な物質を用いた溶解現象の映像提示による効果を実践的に検証した。その結果、事後テストの平均点が期待平均点を上回っていた。このことから、「映像を通して溶かす物、溶ける物の両方の性質が関係していることを学んだことで、『溶解』の現象をよりイメージしやすくなったと考えられる」と結論付けている。さらに、圓谷(2018)¹¹⁾は、小学校教員養成課程の学生の実験に対する不安は大きいこと、望ましい結果が得られなかった場合の理由の説明に対して不安があること、観察・実験を行う場面での安全に関して強い不安を持っていること等を指摘した上で、「図や写真などの映像、動画を活用するなど、多様な提示方法を効果的に用いる必要性」について論じている。多様な表現方法を活用することは学習者側だけでなく、指導者側の指導力向上にも効果があることが示唆される。

しかしながら、学習場面によってはシミュレーションによる学習よりも実際の観察・実験による学習の方が効果的である可能性も指摘されている。先述の土佐・野島・廣野(2020)¹²⁾は、シミュレーションをどのタイミングで導入するのが効果的なのかについて、1組と2組で異なるタイミングで用いた検証授業を行っている。具体的には、1組では先にシミュレーションを使って物が溶けるとはどういうことなのかを考える場を設定し、その後、「長い筒に飽和食塩水を入れた時にどの部分が一番濃いか」という学習課題を設定した。一方、2組では、シミュレーションと学習課題の順番を逆に代入して授業を行った。当初、筆者らは検証結果の予想について、シミュレーションの後に応用問題に取り組んだ1組の方が正答率は高くなるだろうと予想したが、検証の結果、学習問題の正答率は、1組は「72.2%」、2組は「82.4%」であった。つまり、シミュレーションを後に取り入れた2組の方が1組より理解度が10%高かったのである。このことから、シミュレーションが予想の手立てとしては有効でなかったと考えられる。また、「水溶液の濃さについてよくわかったか」という設問に

対して「とてもよくわかった」あるいは「少しわかった」と答えた児童は、両クラスで90%以上であったが、その理由については、『実験がわかりやすかったから』と記述した児童が一番多いという結果になった」と報告している。これらのことから、水溶液の濃度に関しては、シミュレーションを取り入れるタイミングを工夫することはもとより、そもそもシミュレーションによる学習の場だけでなく体感を伴う観察・実験の場を充実させた上でこれを併用することが必要であるということが示唆される。後藤(2013)¹³⁾は、初等で扱う粒子概念の表現については、「小学校段階では、やはり、目の前の事実を説明する手段としての図や粒子概念と捉えたい」と提言する。本単元に置き換えるならば、水溶液中の粒子の均一性を示すような事象を扱った観察・実験がまずあって、その結果を考察する手段として各自のイメージ図やモデル図等で表現する、ということになろう。このことは、文部科学省(2017)¹⁴⁾が、物が溶けるということ、図や絵などを用いて表現したり、説明したりする活動の充実を図るよう指導していることと矛盾しない。単元「物の溶け方」のねらいに「児童が、物が水に溶ける量や様子に着目して、水の温度や量などの条件を制御しながら、物の溶け方の規則性を調べる活動を通して」とあるように、児童自身が実際に観察・実験をすることを通して物の溶け方について理解することを重視しているといえる。

平成29年度告示学習指導要領理科編¹⁵⁾において「溶けている物が均一に広がることにも触れるようにする」ということが明示されたことから、水溶液中の粒子の均一性に関わる観察・実験を志向した教材を開発・工夫することは喫緊の課題の一つだといえる。

Ⅱ. 研究の目的

本研究の目的の第一は、小学校児童に水溶液中の粒子の均一性に関する概念形成を促す実験教材を開発することである。目的の第二は、開発した教材が具備する特徴を評価することである。目的の第三は、本教材を活用した具体的な授業デザインを構想し提案することである。このことは、小学校理科において従来採られてきた教授方略の効果をより向上させることが期待できる。

Ⅲ. 研究の方法

前項の目的を達成するために、次の手続きをとった。

まず、小学校第5学年理科において、水溶液中に粒子が均一に広がっていることを推察させるような事象を提示することができる溶質として、塩化アンモニウム(以下、 NH_4Cl と表記)が適している点を指摘した。

次に、水溶液中の粒子の均一性に関わる事象を提示する教材「複数段可動式析出観察器」を開発した。

さらに、教材「複数段可動式析出観察器」が具備する特徴について、「教材の発展がコンフリクトの自立的生成に及ぼす影響」(澤柿, 2020)¹⁶⁾の枠組みを援用して評価した。

最後に、教材「複数段可動式析出観察器」を活用した授業デザインを構想し提案した。

Ⅳ. 研究の結果と考察

1. 水溶液中に粒子が均一に広がっていることを推察させるような事象を提示することができる溶質の選定

水溶液中の粒子の均一性に関わる観察・実験には大きく2つの手法がある。

一つは、水溶液中での溶質の広がりを観察・実験するもので、例えば、学習指導要領に例示されている「有色のものを溶かしたとき」¹⁷⁾という場合がこれに当たる。「有色のもの」とは、一般的な小学校理科の教科書¹⁸⁾では、具体的には着色されたコーヒーシュガー等が用いられる。これに対して戸井(2019)¹⁹⁾は、「『重さのある粒子はいずれ下に落ちていく』という素朴概念の影響は大きく、コーヒーシュガーが溶ける様子の観察だけでは、水溶液の均一性の概念の獲得は困難であるといえる」と指摘する。また、藤森・三崎・伊藤(2018)²⁰⁾は、溶質として水溶性蛍光性色素ウラニンをを用いた事例を紹介している。ウラニンは水に溶けると黄色を示す特徴があることから、「均一に分散していく過程を追跡可能である」とする。さらに、菊池ら(2021)²¹⁾は、コロイド溶液を用いた事例を紹介している。粒子径が中間のコロイド溶液を用いることで、「粒子が小さい真溶液の均一性に結びつけることができる」と結論づけている。

一方、もう一つは、水溶液中からの溶質が析出する様子を観察・実験するもので、例えば、従前のミョウバンの析出や食塩の蒸発乾固等がこれに当たる。本研究では、後者の手法でアプローチする。また、その際に一般的に用いられる食塩やミョウバンではなく、 NH_4Cl を用いる。

まず、 NH_4Cl を用いる利点を挙げる。寺島(2014)²²⁾は、 NH_4Cl の再結晶を観察する実験を行い、その有用性について考察した。その結果、「 NH_4Cl の樹枝状結晶は、結晶形が溶解前と大きく異なり、結晶成長過程が視覚的に分かりやすい」と報告している。このことから、 NH_4Cl の特徴として、まず析出した結晶を明瞭に観察することができるという点が挙げられる。また、「 NH_4Cl は、溶解度の温度変化も溶解熱も KNO_3 や NH_4NO_3 ほど顕著ではないが、広く人間生活に利用されており、扱い方によっては実感しやすい物質と言える」と述べている。 NH_4Cl はより生活に身近であることから、様々な実験や教材開発への応用が可能であることが示唆される。加えて、薬品の安全性について「 NH_4Cl は毒性、危険性が低く、簡単に流水で廃棄することができる」とされ、教育場面での活用が可能であると考えられる。

次に、一般的に再結晶の実験で用いられる食塩やミョウバンと NH_4Cl を比較する。現在、一般的な教科書に見られる食塩やミョウバンの析出実験では、実際には水に溶けた物質が容器の下層や壁面に固まって析出されることが多い。質量保存の概念形成を志向した観察・実験としては有効であるが、このような析出実験だけでは、「溶けた物は水溶液の下に移動して存在している」といった誤概念の解消には直結しない。また、食塩の溶解度の温度変化は小さく、再結晶に関する学習場面には利用しにくいといえる。また、ミョウバンの結晶成長については、佐藤・渥美(2017)²³⁾が「溶解度曲線にそって溶解度が下がり過剰に溶けているミョウバンの結晶が析出することになると考えられるが、実際はそのようにはならない。ある程度の時間、わずかな過飽和の状態が続き、結晶が析出することなく、過飽和の状態が保たれる」と指摘する。また、先述の寺島(2014)²⁴⁾は「 NH_4Cl は、他の代表的な無機個体と比べても、溶解とその温度変化、再結晶や過飽和の各現象を簡単かつ明瞭に確認できる物質と言える。」と指摘する。このことから、 NH_4Cl が食塩やミョウバンに比べ

て、より手軽で明瞭に水溶液中の粒子の均一性に関わる事象を観察することができる物質であることがわかる。

NH_4Cl を扱う際の留意点については、先述の寺島(2014)²⁵⁾は、上述の通り NH_4Cl の危険性が低いとしながらも、「湯煎時に加熱し過ぎると試験管キャップが飛び外れることがあるため、熱湯の扱いには注意が必要である」と注意喚起している。

2. 教材「複数段可動式析出観察器」の開発

先述の通り、水溶液中に溶解している溶質を観察・実験する方法として、一般的には、ミョウバンの析出や食塩の蒸発乾固等がある。この時、水溶液の均一性まで確かめるには、上層や下層の水溶液を採取し、蒸発乾固によって取り出した結晶の量を比較することになる。しかしながら、この方法では水溶液中の上層や下層から溶質が直接析出してくる様子は観察できない。一方、水溶液中の上層や下層から溶質が析出し沈降していく様子を水溶液中で観察・実験する方法としては、先述の寺島が、蓋付き試験管を用いた実験器具を紹介している。しかしながら、水に溶けた物が均一に広がっていることまでを実証しようとするならば、水溶液の上層と下層のどちらにもほぼ同量の溶質が含まれていることを確認する必要がある。

このように、これまでの観察・実験の方法だけでは、液体の上層にも下層にも同じように溶けていた物が溶けているのだろうか、などといった子どもらしい疑問や発想を生かした活動ができないことが危惧される。今日求められている主体的で対話的な学びを志向した授業では、例えば、溶けた物はいつも下の方に集まっているのではないか、いや別の場所にも少しはあるのではないか、そもそも水に溶けた物はどのように存在しているのか等、多様で本質的な問いが生まれる局面が重要であるといえる。

この点について、鼎(2019)²⁶⁾は、水に溶けたミョウバンが均一に溶解しているを意識していない児童に3段の仕切りがある容器を提示したところ、それを契機に、「水溶液中にミョウバンはどのように存在しているのだろうか」という問いがつけられたことを報告している。この事例では、周到に工夫され

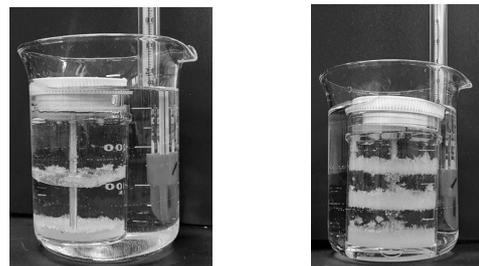
た教材の提示が、児童らの問いの生成に有効に働いたことが具体的に示されている。教材開発の視点の1つは、まさに、多様で本質的な問いが生まれるようにすることであろう。もう1つ教材開発の視点を挙げるならば、自らの問いを解決するための実現可能な方法を自ら立案することができるようにすることだといえる。

そこで、本教材「複数段可動式析出観察器」(図1)を開発した。本教材の主な仕様は以下である。

本教材の主な特徴としては、容器に仕切り板が装着されていること、その仕切り板は可動式であり児童らの問題意識に応じて析出の様子を確かめられること、仕切り板の数を自由に増減できること、それらの操作は比較的安全で直感的であること、比較的安価で手軽に作成できること等があげられる。

次に、本教材では実際にどのような事象がみられるのかについて検証した。結果として現れる現象は、先の鼎の事例と同様になることは容易に想像される。しかも、ミョウバンと違って NH_4Cl では、水溶液中の至る所で結晶の析出の瞬間が確認でき、成長した結晶が水溶液中の至る所から降ってくる様子も捉えられると考えられる。本項では、実際の NH_4Cl の析出の様子について、仕切りなし、2階建て、3階建てのケースを比較して示す(図2)。なお、検証にあたっては、小学校での観察・実験を想定した予備実験を踏まえて行った^{注3)}。

検証の結果、いずれのケースにおいても塩化アン



主な仕様

- ・蓋付き棒びん(約80ml)
- ・ふた(内側に厚めの両面テープを添付)
- ・仕切り版(蓋付き棒びんの内径に合わせて円盤状に切り抜いた薄くて丈夫なプラスチック板)
- ・可動幅調節用の支柱(長ねじ3*70mm、ナット)

図1. 教材「複数段可動式析出観察器」

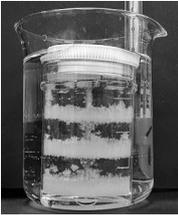
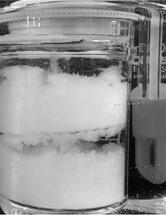
	仕切りなし	2階建て	3階建て
<p>開始期</p> <p>水溶液中に溶け残りがなく透明な飽和状態で、結晶の析出は確認できない。</p>			
	0秒 60℃	0秒 60℃	0秒 60℃
<p>生成期</p> <p>最初の結晶の析出が確認できる。</p>			
	1分後	1分後	30秒後
<p>活発期</p> <p>比較的大粒の結晶が大量に降り続く。</p>			
	3分後	2分後	1分後
<p>最大期</p> <p>析出した大きな結晶が上から降ってくる様子が明瞭かつ継続的に観察でき、析出した結晶の堆積物が2cm程度に達する。</p>			
	3分30秒後	3分後	2分後
<p>終焉期</p> <p>次第に析出の勢いが静かになり、上から結晶が降ってくる様子の観察が分かりづらくなっていく。</p>			
	5分30秒後	5分30秒後	5分後
<p>完了期</p> <p>結晶の析出が完全に落ち着きほぼ変化がみられなくなる。</p>			
	6分30秒後 24℃	7分後 24℃	6分後 24℃

図2. 仕切りなし、2階建て、3階建てのケースにおける実際のNH₄Clの析出の様子と比較

モニウムが容器の上層から析出してくる様子が確認できた。とりわけ、2階建て、3階建てのケースのように階層を分けた場合、上層・中層・下層のどの階層においてもほぼ同量の析出があったことを視覚的に捉えることができた。具体的には、まず実験開始から30秒～1分程度で最初の結晶の析出が確認できる「生成期」を迎える。このときの結晶はまだ小さく確認しづらい。その後、徐々に析出の量が増え始め、およそ1～3分程度の間には、比較的大粒の結晶が大量に降り続く「活発期」を迎える。その後も析出した大きな結晶が上から降ってくる様子が明瞭かつ継続的に観察でき、2～3分30秒程度の間には、結晶の堆積が2cm程度に達する「最大期」を迎える。やがて、5～5分30秒程度後には、次第に析出の勢いが静かになり、上から結晶が降ってくる様子が観察しづらくなる「終焉期」を迎える。そして、6～7分程度後にはほぼ変化がみられなくなる「完了期」を迎える。結晶の析出が完全に落ち着いた時点では、蓋付き棒びんの約8分目まで結晶が堆積しているのがわかる。なお、 NH_4Cl を扱う際の留意点については、先述の寺島(2014)が指摘していたように、本実験においても、実験の翌日に蓋付き棒びんの蓋が外れていたことがあった。注意を払いたい。

以上のように、本教材では、これまで水溶液中に均一に広がって溶けていたものを直接的に観察することが難しかった事象を、より視覚的に提示することが可能となったといえる。この一連の事象から、児童らが、塩化アンモニウムが水溶液全体にほぼ均一に溶けていたのではないかと推察することはさほど困難ではないであろう。このとき、児童らが均一性について自ら納得しようとしてさらに階層を増やして確かめたいといった発想をすることも想定される。2階建て、3階建てになるほど各層の高さが短くなるため、析出した結晶が水溶液中の上層から降る様子を明瞭に観察するには2階建てのケースの方が適しているといえる。本教材の発展型として、より細長い蓋付き試験管等を用いた「複数段可動式析出観察器」を作成することも考えられよう。単に容器の上層や下層のどこからでも析出する様子が観察できることに特化するならば、2Lのペットボトル等の大きな容器で代用することも可能である(図3)。本教材の使用を想定した学習場面については、別項において詳述する。

3. 教材「複数段可動式析出観察器」の評価

本項では、教材「複数段可動式析出観察器」が具備する特徴を、澤柿(2020)の「教材の発展がコンフリクトの自立的生成に及ぼす影響」の枠組みを援用して評価した。これを表1に示す。

まず、本教材は、蓋付き棒びんに NH_4Cl の飽和水溶液約50ml程度を注ぎ、常温の水を入れたビーカー内で冷却するだけの簡便な作業で析出の様子が観察できる。素材には軽量で扱いやすいものを用いているため比較的安全に目的に応じた観察・実験を行うことができる。また、本教材で用いる NH_4Cl の樹枝状結晶は、結晶成長過程が視覚的に明瞭に観察でき、かつ、広く人間生活に利用され、毒性、危険性が低く、簡単に流水で廃棄することができる。これらことから、本教材には、i：児童からのアクセスを容易にするシンプルな構造が具備されているといえる。

次に、本教材は、容器内で複数の階層を設定することができる円盤状の仕切りによって、溶けていた物が底部に存在するという固定観念と相反する事象を提示することができる。また本教材で用いる NH_4Cl は、数十秒から数分の内に目の前で結晶が析出する瞬間を確認できる。溶けて見えなくなった物が水溶液中の至る所から結晶として姿を現す現象は児童らのそれまでの心象を見直す契機となると考えられる。これらのことから、本教材には、ii：相反するような複数の心象を想起させるマルチプルな構造が具備されているといえる。

次に、本教材は先述のように容器内の任意の高さで複数の階層を設定することができる。また、その階層の設定もネジを回すだけで微調整が可能で、その操作方法は直感的である。そのため、児童らが自

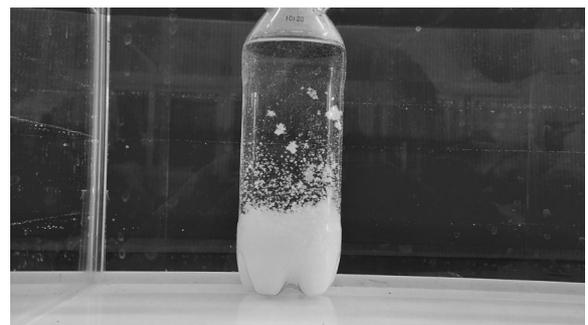


図3. 2Lのペットボトルを用いた析出の観察

らの問題意識に応じて条件を変えながら試行することを可能とする。これらのことから、本教材には、iii：問題意識に応じてトランスフォームできるフレキシブルな構造が具備されているといえる。

一方、本教材は、水溶液中の粒子の均一性に関わる概念形成を志向して開発されたものであるが、使用する場面や扱い方によっては、単に、学習者の興味をひくだけのいわゆるびっくり教材となったり、やや説明的な要素が強くなったりすることも危惧される。その場合、本教材が、「児童らのコンフリクトを自立的に生成とその自覚化」や「コンフリクトの解消」に機能するとまではいえない可能性があるといえる。

以上から、本教材には、コンフリクトの自立的生成過程に有効に働くような3つの特徴が具備されていることが示唆された。一方、児童らのコンフリクトを自立的に生成・解消させるには、教材の一部改善に加えて、本教材の特徴を最大限に生かすような授業デザインの工夫が併せて求められる。この点については、次項で詳述する。

4. 教材「複数段可動式析出観察器」を用いた小学校第5学年理科「物の溶け方」の授業デザイン

本項では、本教材を活用した小学校理科における

授業デザインについて述べる。表2に、第5学年理科単元「物の溶け方」の主な学習内容と単元の全体計画を、表3に本単元において水溶液中の粒子の均一性を扱う一単位時間のねらいを、表4にその時間に発現することが想定されるコンフリクトの例を示す。

本単元(全12時間)において水溶液中の粒子の均一性を扱う一単位時間(10/12時)の授業デザインについて述べる。本時までには、内容ア-(イ)および(ウ)の一部については既習事項となっている。なお、授業デザインを構想するにあたっては露木(2007)²⁷⁾及び国立教育政策研究所(2010)²⁸⁾の二重否定を取り入れた学習指導案の事例を参考にした^{注5)}。

まず、授業序盤で、児童らは、まず「溶けた物は水溶液中のどこにいったのか」について考える。この時、児童らは、それまでの生活経験や既習事項をもとに「水溶液の下の方にいったのではないか」、「いや、少しは水溶液の上の方にもあるのではないか」と予想する。

授業中盤では、児童らは、「水に溶かしたNH₄Clが目前で析出する」という事象に触れる。このことで児童らは、「おや、溶けていた物が現れる瞬間が見えたぞ」、「いや、溶けた物が液の上層から出てくるはずがない。」といった矛盾(コンフリクト)を自覚し葛藤していくようになる。

授業終盤では、「だったら、容器を1階、2階に仕切ってみたら、溶けた物がどこにどのくらいあるのかわ

表1 教材「複数段可動式析出観察器」が具備する特徴

教材の構造の発展過程	コンフリクトの自立的生成過程に及ぼす影響	本教材と児童らの関わり方の例
a： 児童からのアクセスを容易にするシンプルな構造	i： コンフリクトの生成準備	児童らが、比較的安全な教材を簡便に操作することを通して、具体的な事実や事象等に触れながら問題を把握したり、これまでの経験や既習事項を想起したりして、自分の考えを率直に表現する。
b： 相反するような複数の心象を想起させるマルチプルな構造	ii： コンフリクトの自立的生成とその自覚化	児童らが、NH ₄ Clの結晶成長過程を視覚的に明瞭に観察よることを通して、それまでの、溶けていた物は底部に存在する等といった固定観念と相反する事象の存在を自覚する。
c： 問題意識に応じてトランスフォームできるフレキシブルな構造	iii： コンフリクトの解消	児童らが、新たな視点を導出したり、自ら条件を制御して調べたりするなど、検証可能な方法を立案して観察・実験を行い、水溶液中の粒子の均一性に関してより妥当な概念を形成する。

「教材の発展がコンフリクトの自立的生成に及ぼす影響」(澤柿, 2020)を援用して、筆者作成

かるのではないか」という新たな視点を導く。そして児童らは、条件を変えながら互いの予想を確かめる観察・実験に取り組む。やがて、本教材を用いた観察・実験を通して、自らのコンフリクトを解消させていく。その結果として、児童らは、既習事項の「溶けた物は水溶液中に存在する」ことに加えて、「溶けた物は水溶液全体に均一に広がっている」という、より妥当な概念を獲得していく。

以上、本時(10/12時)の授業デザインの例を表5に示す。本授業デザインでは、「溶けた物が液の上層に滞留しているはずがない」というコンフリクトによって一旦は否定される場面が保障されていることに加えて、「水溶液中の粒子の均一性」という新たな概念の獲得によって二重否定され再構成されるといった場面が保障されているといえる。

V. 研究のまとめ

1. 研究の成果

本研究の目的の第一は、小学校児童に水溶液中の粒子の均一性に関する概念形成を促す実験教材を開発することであった。その結果、容器内の任意の位置で複数の階層を設置できる教材「複数段可動式析出観察器」を開発した。本教材では、これまで水溶液中に均一に溶けていた物を直接的に観察することが難しかった事象を、より視覚的に提示することが可能となった。また、比較的安全で簡便な手順で扱うことができ、その操作も直感的である。使用する場面によっては、本教材が「そもそも水に溶けたものはどこに存在しているのか」等の本質的な問いを生み出したり、それを実現可能な方法で解決したりする場面で効果的に活用することができる可能性が示された。これまで水溶液中の粒子の均一性について明示的に学ぶ教材はほとんどなく、今後の小学校理科において従来用いられてきた教授方略の効果をより向上させることが期待できる。

目的の第二は、開発した教材が具備する特徴を評価することであった。澤柿(2020)の「教材の発展がコンフリクトの自立的生成に及ぼす影響」の枠組みを援用して評価した結果、本教材には、コンフリクトの自立的な生成を促すことに機能する3つの特徴が具備されていることが確かめられた。一方、階層

をさらに増やした場合には観察がしづらくなることや、単に説明的な場面でこれを用いた場合は児童らのコンフリクトを自立的に生成させるとまではいえない可能性があること等、改善すべき点が浮き彫りとなった。

目的の第三は、本教材を活用した具体的な授業デザインを構想し提案することであった。第5学年理科単元「物の溶け方」(全12時間)において水溶液中の粒子の均一性を扱う一単位時間(10/12時)の授業デザインを構想した結果、コンフリクトが自立的に生成・解消される局面を想定することが可能であることが示された。また、この授業デザインは、露木(2007)及び国立教育政策研究所(2010)が提案する二重否定を取り入れた学習指導案にも対応できるものである。

2. 残された課題

今後は、本教材を実際の授業において運用し、実践的なデータを取得するとともに、その有効性と改善点等について検討することが課題である。

附記

本論文は、第二著者である中村綾友氏が松本大学教育学部に卒業論文として提出した「水溶液中の粒子の均一性に関する概念形成を促す教材開発—小学校第5学年理科「ものの溶け方」での活用を志向して—」(2022)²⁹⁾、ならびに、第三著者である鼎裕憲(現：富山市立新庄北小学校教諭)「溶けているものの均一性についての学習の在り方」²⁶⁾の継続研究であり、その内容に新たなデータや分析を加えて大幅に加筆・修正を加えたものである。

注釈

注1 小学校学習指導要領理科編における「粒子」の系統性ならびに小学校第5学年理科「物の溶け方」の内容の扱い

平成29年度告示学習指導要領理科編(文部科学省(2017), p20)³⁰⁾では、内容区分「A物質・エネルギー」において「粒子」を科学の基本的な概念の柱の一つと位置付けて内容の系統性を図っている。

具体的には、小学校第3学年では、「粒子」についての基本的な概念などを柱とした内容のうちの「粒子の保存性」に関わる学習を行う。この単元「A(1)物と重さ」は次に第5学年「A(1)物の溶け方」の学習につながる。

第4学年では、「A(1)空気と水の性質」及び「A(2)金属、水、空気と温度」の2つの単元が設定される。前者は「粒子の存在」に関わるものであり、第6学年「A(1)燃焼の仕組み」の学習につながる。一方、後者は「粒子のもつエネルギー」に関わるものであり、中学校第1分野「(2)ア(ウ)状態変化」の学習につながる。

第5学年では、「粒子の保存性」に関わる単元「A(1)物の溶け方」が設定される。第3学年「A(1)物と重さ」の学習を踏まえるとともに、第6学年「A(2)水溶液の性質」の学習につながる。

第6学年では、「A(1)燃焼の仕組み」、「A(2)水溶液の性質」の2つの単元が設定される。前者は、「粒子の存在」、「粒子の結合」に関わるものである。第4学年「A(1)空気と水の性質」の学習を踏まえるとともに、中学校第1分野「(2)ア(ア)物質のすがた」、「(4)ア(イ)化学変化」の学習につながる。また、後者は「粒子の結合」、「粒子の保存性」に関わるものである。第5学年「A(1)物の溶け方」の学習を踏まえるとともに、中学校第1分野「(2)ア(イ)水溶液」、「(4)ア(イ)化学変化」の学習につながる。

このように、小学校中学年で扱う「エネルギー」、「粒子」の分野の内容は高学年に引き継がれ、その後も、中学校以上につながるものであることがわかる。

注2 水溶液中の粒子の均一性に関わる学習者のイメージ

水溶液中の粒子の均一性に関わる学習者のイメージについては、さらに菊地ら(2021, p249)³¹⁾が、中学校第1学年368名、中学校第2学年357名を対象に調査を行なっている。その結果、「ア. 全体に広がっている: 第1学年66%: 第2学年41%」、「イ. 上部に集まる: 第1学年3%: 第2学年1%」、「ウ. 下部に集まる: 第1学年31%: 第2学年58%」、「エ. 中央に集まる: 第1学年0%: 第2学年0%」であったことを報告している。

注3 小学校での観察・実験を想定した予備実験

まず、実験に適した溶液の温度を調べた。ピーカーに100mlの水を入れ、水温を20℃、40℃、60℃、80℃に設定して湯煎しながらNH₄Clを

溶かす。その際、例えば、「理科年表(2020)」³²⁾では、20℃でNH₄Clは37.2g溶けると報告されているのでそれを参考にする。小学校での観察・実験に適した温度等を判断する際は、実際の小学生の作業実態等を考慮する。例えば、湯煎時の温度が低い場合は、実験をする際の危険性が低いが、溶解量が少なく析出現象の観察がわかりづらいということが懸念される。

表6に示した結果をもとに、以下のように温度設定を判断した。20℃、40℃の場合では、やけど等の危険性が低いが、NH₄Clの溶解量や常温との温度差が少ないため、析出現象を十分に観察することが難しいと考えられる。反対に、80℃の場合では、NH₄Clの溶ける量は多いものの、実験の危険性が増す。一方60℃の場合では、NH₄Clの溶解量が50g以上とよく溶け、冷却時に析出するNH₄Clを十分に観察することができる。ピーカーや装置がやや熱くなるので安全性への配慮は必要であるが、80℃の際と比べて危険性はやや低いといえる。以上のように安全性やNH₄Clの溶ける量を吟味した結果、水温は高くても50~60℃が適していると判断した。

表6 NH₄Clの溶解度(参考:「理科年表」(2022))

NH ₄ Cl	20℃	40℃	60℃	80℃
理論値	37.2 g	45.8 g	55.2 g	65.6 g
実際値	37.2 g	43.7 g	50.7 g	60.2 g

次に、NH₄Clの析出現象を観察した。蓋付き棒びんの中にNH₄Cl水溶液を入れ、湯煎にて60℃に温める。冷却装置として、水を張った300mlのピーカーを用意しその中に蓋付き棒びんを入れて観察した。その経時変化について、便宜上、「開始期」「生成期」「活発期」「終焉期」「完了期」の5つに分類した。これを表7に示す。

表7 析出の経時変化の様子

仕切りなし	析出の経時変化の様子
「開始期」 結晶の析出は確認できない時点を「開始期」とする。	水溶液中に溶け残りがなく透明な飽和状態で、結晶の析出は確認できない。
「生成期」 結晶の析出が現れ始めた時点を「生成期」とする。	細かい結晶が1、2粒降り出し始める。結晶の大きさはかなり小さく、結晶を捉えることが難しい段階である。
「活発期」 結晶の析出が活発になった時点を「活発期」とする。	蓋付き棒びんの中腹部や上層から大量の結晶が降り積り、1~2cm程度堆積し始める。結晶の大きさも大きくなり析出の様子が視覚的に捉えやすくなる。
「終焉期」 結晶の析出反応が最大限に観察できる時点を「最大期」とする。	生成された結晶の析出が最大値に達する。大きな結晶が最大限に観察できる様子が明瞭に観察できる。およそ蓋付き棒びん6分目まで積もる。

「終焉期」	次第に析出の勢いが静かになる。結晶の大きさが細くなり上から結晶が降ってくる様子が分かりづらくなる。
「完了期」	ほぼ変化がなく、結晶の析出は確認できない。結果としておよそ蓋付き棒びん8分目まで積もった。

注4 シュリーレン現象

山本³³⁾は、シュリーレン現象について「透明物体内の屈折率のむらから生じる現象で、かげろう様のゆらぎをいう。ガラスのつなぎ目や、空気中の衝撃波などでも観測される。」と説明する。

注5 二重否定

露木²⁶⁾は、「事象に『矛盾』があるのではなく、人間の認識と事象の間に『矛盾』は存在する」と指摘する。具体的には、当初は矛盾に感じられたものが矛盾でなくなるような二重否定による再構成の場面を意図的に学習指導案の中に組み入れることを提案している。

引用文献

1) 文部科学省「平成29年度告示学習指導要領理科編」p63(2017).

2) 文部科学省, 前掲p20(2017).

3) 坂本有希・菊池洋一・武井隆明・村上祐, 「異なる学習課題が中学生の溶解現象の理解に及ぼす影響」岩手大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要, 第15号, pp.101-102(2016).

4) 文部科学省, 前掲p64.

5) 村上祐, 「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, 69号, p.78(2009).

6) 土佐幸子・野島優作・廣野達也, 「小学校理科学習における粒子モデルとICT活用—ものの溶け方の単元において—」新潟大学教育学部研究紀要, 人文・社会科学編, 第13巻, 1号, p105(2020).

7) 土佐幸子・野島優作・廣野達也, 前掲(p106).

8) 国立教育政策研究所, 『特定の課題に対する調査』p22(2006).
https://www.nier.go.jp/kaihatsu/tokutei_rika/06002040000004000.pdf
(閲覧日2022.9.15).

9) 齋藤裕一郎・小野瀬倫也・鈴木一成, 「動画モデル作成を通じた科学概念構築に関する一考察—中学校『水の状態変化』の授業分析を事例にして—」理科教育学研究, 55巻, 3号, pp.311-322(2014).

10) 奥律枝, 「岩波科学映画〈溶解〉による『ものの溶け方』の理解を深める取り組み」日本科学教育学会年会論文集, 43巻(0), pp.275-276(2019).

12) 圓谷秀雄, 「映像・動画資料の活用で向上する

指導能力」日本デジタル教科書学会発表予稿集, 7巻(0), pp.59-60(2018).

13) 土佐幸子・野島優作・廣野達也, 前掲(pp.99-115).

13) 後藤健, 「小学校で子どもが獲得する粒子概念とは」日本理科教育学会全国大会要項, 63号, pp.77-78(2013).

14) 文部科学省, 前掲, p64.

15) 文部科学省, 前掲, p64.

16) 澤柿教淳, 「教材の発展がコンフリクトの自立的生成に及ぼす影響」教材学研究, 第31巻, pp.19-28(2020).

17) 文部科学省, 前掲, p64.

18) 例えば, 「みんなと学ぶ小学校理科5年」pp.146-147(2020).

19) 戸井伸泰, 「定量的実験を軸にした科学概念の形成—『水溶液の均一性』概念の定着を目指して—」教育実践研究, 第29巻, pp.67-72(2019).

20) 藤森隼一・三崎隆・伊藤冬樹, 「水溶性蛍光性色素を用いた溶液中における溶質の均一性の実感」日本科学教育学会年会論文集, 42巻, pp.286-288(2018).

21) 菊池洋一・齊藤友哉・久坂哲也・佐々木聡也・菊池永, 「コロイドを効果的に用いる中学校の溶液の学習」理科教育学研究, Vol.62巻, No.1, pp.247-259(2021).

22) 寺島幸生, 「塩化アンモニウムの再結晶を観察する個別実験用教材の開発とその利用: 一理科授業、科学実験イベント、探求活動での実践—」理科教育学研究, 55巻, 2号, pp.209-218(2014).

23) 佐藤真理・渥美みはる, 「実験で学ぶ化学: VI. 無機化学」東京女子大学紀要論文科学部門報告, 67巻, 3号, pp.2037-2054(2017).

24) 寺島幸生, 前掲, p210

25) 寺島幸生, 前掲, p215

26) 鼎裕憲, 「溶けているものの均一性についての学習の在り方」科学と教育, 67巻, 4号, pp.154-155(2019).

27) 露木和男, 「矛盾をうまく取り入れて学力を伸ばす学習指導案」学事出版, pp.2-6(2007).

28) 国立教育政策研究所(2010), 「教育課程研究指定校事業平成22年度研究成果報告書〈教育課程〉」
https://www.nier.go.jp/kaihatsu/shidou/report/kyouiku/21&22/shougaku/4_s_rika.pdf#search=%27露木+二重否定%27
(閲覧日2022.9.15)

29) 中村綾友, 「水溶液中の粒子の均一性に関する概念形成を促す教材開発—小学校第5学年理科『ものの溶け方』での活用を志向して—」(2022).

30) 文部科学省, 「平成29年度告示学習指導要領理科編」p20(2017).

31) 菊池ら, 前掲, p249.

32) 自然科学研究機構国立天文台編, 「机上版 理科年表」丸善出版株式会社, p.532(2022).

33) 山本勝博, 「溶解におけるシュリーレン現象を利用した飽和溶解濃度の測定」43巻, 11号, pp.720-722(1995).